UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARRTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN MECCATRONICA

TESI DI LAUREA

COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA APPLICATA ALL'EQUIPAGGIAMENTO ELETTRICO DELLE MACCHINE

Relatore: Ch.mo Prof. Alessandro Sona

Laureando: FEDERICO BERTAGNOLI
Matricola 544706-IMC

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Sommario

Lo sviluppo della tecnologia ha reso disponibili sistemi di controllo sempre più potenti, compatti e, sotto certi aspetti, più affidabili, rendendoli tuttavia maggiormente sensibili nei confronti di fenomeni fisici quali quelli elettromagnetici.

In questa tesi viene affrontato il problema delle interferenze elettromagnetiche con particolare riferimento a un tipico equipaggiamento elettrico di una macchina automatica. Viene inoltre illustrata la questione della compatibilità elettromagnetica nel contesto della Dichiarazione di conformità e conseguente marcatura CE, necessarie per poter immettere un prodotto sul mercato dell'Unione Europea.

Indice

Elenco delle tabelle

Elenco delle figure

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito della progettazione di macchine automatiche speciali, una grande parte del lavoro consiste nella cosiddetta "progettazione creativa/innovativa", che è l'opposto della "progettazione di routine" (probabilmente più conveniente dal punto di vista economico, ma anche più noiosa). I problemi (principalmente di natura industriale) che si affrontano sono ogni volta diversi. Le soluzioni che si adottano sono il risultato di un'esperienza che con il passare del tempo diventa naturalmente multi-settoriale, e allo stesso tempo dipendono fortemente dall'attività di aggiornamento, utile e necessaria, riguardo ad un sapere scientifico e tecnologico che manifesta una crescita stupefacente, ma che fortunatamente è sempre più facile da reperire.

Una macchina industriale può essere vista come un sistema, un insieme di parti tra loro collegate, di cui almeno una in movimento, che realizzano una funzione specifica.
Anche le macchine progettate per lo svolgimento dei compiti più semplici presentano, allo stato attuale, un equipaggiamento di tipo elettrico ed elettronico.

Da questo derivano principalmente vantaggi di tipo economico e prestazionale, grazie alla possibilità di ridurre la complessità meccanica nonché i tempi di sviluppo, ed grazie alla possibilità di implementare funzioni, quali quelle di visione computazionale, impossibili da realizzare con il solo ausilio della meccanica.
Lo svantaggio consiste essenzialmente nella maggiore vulnerabilità di tali sistemi nei confronti delle interferenze elettromagnetiche EMI (Electromagnetic Interferences).

Scopo di questa tesi

Questa tesi vuole essere una introduzione all'argomento EMC (Electromagnetic Compatibility), nel contesto della Dichiarazione di Conformità e conseguente marcatura CE (Conformità Europea), prendendo in considerazione sia il fenomeno fisico delle interferenze elettromagnetiche (naturalmente implicato),

sia alcune regole progettuali di vasta applicabilità che consentono di ridurre la probabilità di malfunzionamenti dovuti a queste stesse interferenze, con particolare riferimento a un tipico quadro elettrico di bordo macchina.

La ragione per cui è stato scelto questo argomento è l'esigenza riscontrata durante il periodo di tirocinio di applicare le principali direttive di riferimento, in particolare la direttiva EMC, la cui conoscenza è indispensabile per la progettazione di dispositivi che integrino al loro interno una parte elettronica (semiconduttori), o anche solo elettrica (conduttori).

Contenuto di questa tesi

La tesi è divisa in 4 capitoli:

- Capitolo 1 – è una breve introduzione all'argomento
- Capitolo 2 – è una contestualizzazione dell'argomento compatibilità elettromagnetica nell'ambito della conformità di un prodotto ai requisiti essenziali delle principali Direttive Europee, ai fini della marcatura CE dello stesso.
- Capitolo 3 – prende in considerazione le cause e gli effetti delle interferenze elettromagnetiche, nonché il modello teorico che descrive i fenomeni di interferenza.
- Capitolo 4 – riporta molte delle regole generali, di carattere pratico, applicabili nell'attività di progettazione di un qualsiasi sistema elettrico/elettronico, al fine di ottenere la più alta probabilità di conseguire la compatibilità elettromagnetica dello stesso, con particolare riferimento al caso di un tipico quadro elettrico di bordo macchina.

Capitolo 2

Direttive Europee e Marcatura CE

2.1 Dichiarazione di conformità

La Dichiarazione di Conformità e la conseguente marcatura CE rappresentano un requisito essenziale per l'immissione sul mercato dell'Unione europea di un prodotto. Con essa il fabbricante (o il suo mandatario stabilito nella Comunità) dichiara che la macchina o dispositivo messi in commercio rispettano tutti i requisiti essenziali di sicurezza e sanitari che la concernono.

Il marchio CE deve essere apposto sulla macchina/apparecchiatura e/o sull'imballaggio della stessa e/o sulle istruzioni per l'uso e/o sul tagliando di garanzia.

La Dichiarazione di conformità deve essere redatta dal fabbricante o da un suo mandatario, nel caso in cui questi siano residenti all'interno dell'unione europea, oppure da colui che si rende responsabile dell'immissione sul mercato europeo.

Nel caso di una macchina automatica, le Direttive fondamentali di riferimento sono:

- la Direttiva Macchine (Direttiva 2006/42/CE),
- la Direttiva EMC (Direttiva 2004/108/CE)
- la Direttiva LVD (cioè direttiva bassa tensione 2006/95/CE).

La marcatura CE è apposta solitamente in regime di autocertificazione, ovvero il fabbricante individua le norme applicabili nel caso specifico, effettua le prove di valutazione e a seguito di ciò, se l'apparecchiatura è giudicata conforme, lo dichiara per iscritto e si assume la responsabilità della propria dichiarazione; per questo si può parlare di presunzione di conformità. Quindi la procedura è molto semplice dal punto di vista amministrativo perché la documentazione richiesta per la dichiarazione di conformità è unica ed il fabbricante non è tenuto ad includere alcun fascicolo tecnico che mostri l'iter seguito per raggiungere la conformità; deve solamente essersi accertato e poter garantire che la

Dichiarazione sia e resti disponibile nei suoi locali ai fini di un eventuale controllo, per un periodo di dieci anni dall'immissione del prodotto sul mercato. In realtà, la documentazione che il fabbricante sarebbe tenuto a presentare nell'eventualità di un controllo, non consisterebbe solo nella semplice Dichiarazione di conformità, ma dovrebbe comprende anche:

- un fascicolo tecnico della costruzione composto:
  - da un disegno complessivo della macchina e degli schemi dei circuiti di comando;
  - dai disegni dettagliati e completi, eventualmente accompagnati da note di calcolo, risultati di prove ecc., che consentano la verifica della conformità della macchina ai requisiti essenziali di sicurezza e sanitari;
  - dall'elenco: dei requisiti essenziali delle direttive applicate, delle norme e delle altre specifiche tecniche applicate nella progettazione della macchina;
  - dalla descrizione delle soluzioni adottate per prevenire i rischi presentati dalla macchina;
  - opzionalmente, qualsiasi relazione tecnica o certificato ottenuti da un organismo o un laboratorio competente;
  - se si dichiara la conformità ad una norma armonizzata che lo prevede, qualsiasi relazione tecnica che fornisca i risultati delle prove svolte, a sua scelta, da lui stesso [fabbricante] o laboratorio competente;
  - da un esemplare delle istruzioni per l'uso della macchina;

- Nel caso di produzione in serie, le disposizioni interne che saranno applicate per mantenere la conformità delle macchine alle disposizioni della direttiva.

Come appena detto, le Direttive stesse chiariscono che non è necessario che tale documentazione esista materialmente in permanenza; deve soltanto poter essere resa disponibile entro un periodo di tempo compatibile con la sua importanza. La mancata presentazione della documentazione in seguito a una domanda debitamente motivata delle autorità nazionali competenti può costituire un motivo sufficiente per dubitare della presunzione di conformità alle disposizioni delle direttive.

Ci sono casi in cui il costruttore non ha applicato le norme armonizzate, o perché ciò non era possibile, o perché non presenti. Per poter immettere il proprio dispositivo sul mercato la procedura diventa allora un po' più complessa visto che non è più sufficiente un'autocertificazione.
In un caso come questo il costruttore deve produrre una *documentazione tecnica di costruzione* (TCF) che includa le seguenti informazioni:

- una descrizione generale del prodotto;
- i disegni di progetto e di costruzione, unitamente agli schemi di montaggio dei componenti, sottoassiemi, circuiti ecc.;
- le descrizioni e le spiegazioni necessarie per comprendere i suddetti disegni e schemi, così come gli aspetti funzionali del prodotto;
- l'elenco delle norme applicate integralmente o in parte e la descrizione delle soluzioni adottate per ottemperare ai requisiti di protezione della Direttiva nel caso in cui le norme non siano state applicate;
- i risultati di calcolo di progetto derivanti dalle prove EMC;
- i rapporti sulle prove effettuate (qualora nel corso della produzione vengano apportate delle modifiche che possano pregiudicare alcuni aspetti di compatibilità elettromagnetica o di sicurezza elettrica, è necessario ripetere le prove che attestano la conformità);
- un rapporto o certificato tecnico emesso da un Organismo competente che abbia valutato e avvallato le scelte fatte dal costruttore;
- una copia della dichiarazione di conformità CE;
- una copia delle istruzioni per l'uso.

Nel caso in cui il prodotto sia un apparato di radiocomunicazione, deve essere coinvolto un Organismo notificato in ambito UE, che possa rilasciare un Certificato CE di tipo dopo aver svolto le prove all'interno di un laboratorio accreditato.

Organismo competente:
un Organismo è considerato competente se soddisfa i criteri stabiliti nell'allegato II della Direttiva, ovvero è riconosciuto e notificato dalle autorità competenti di uno Stato Membro dell'EEA (European Economic Area). Si occupa dell'accreditamento dei laboratori. É responsabile per l'emissione delle relazioni tecniche o dei certificati per gli apparati nel caso in cui il costruttore non abbia applicato le norme, o perché ciò non era possibile o perché non presenti.

Organismo notificato:
è un Organismo di certificazione o Ente di certificazione o Laboratorio di prova autorizzato dall'Autorità Governativa Nazionale e notificato alla Commissione Europea, per attuare i compiti legati alla applicazione delle procedure europee di conformità di prodotti e servizi ad operare sulle Direttive Europee. É responsabile per l'emissione di certificati di esame CE.

Laboratorio accreditato:
è un laboratorio qualificato a svolgere prove e tarature in cui vengono garantite l'adeguatezza ed accuratezza delle misure che vengono eseguite grazie

all'impiego di strumentazione “tarata”. L'accreditamento viene conseguito per ogni prova o taratura a seguito del superamento di una visita ispettiva da parte da parte dell'organismo competente, in cui viene verificato che siano stati soddisfatti i requisiti della norma.

DICHIARAZIONE CE DI CONFORMITÀ CE

La Ditta ....
....:
Via ....

Dichiara sotto la propria responsabilità che la macchina:

ROTOPRESSA ....
modello ....
matricola n. ....
anno di costruzione ....

È conforme a tutte le disposizioni pertinenti delle seguenti Direttive Europee:
Direttiva 2006/42/CE Direttiva Macchine.
Direttiva 2004/108/CE Direttiva compatibilità elettromagnetica.
Direttiva 2006/95/CE Direttiva bassa tensione.

Avendo applicato per l'adeguamento della macchina, per quanto pertinenti, le seguenti norme armonizzate e specifiche tecniche:
UNI EN ISO 12100:2010 ”Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio”
UNI EN ISO 4254-1:2010 “Macchine agricole - Sicurezza - Parte 1: Requisiti generali”
UNI EN ISO 4254-11:2011 “Macchine agricole - Sicurezza - Parte 11: Raccoglimballatrici”
ISO 11684 “Trattrici, macchine agricole e forestali, macchine a motore da giardinaggio - Segni grafici per la sicurezza e pittogrammi di segnalazione dei pericoli - Principi generali”
CEI EN 60204-1 “Sicurezza del macchinario - Equipaggiamento elettrico delle macchine - Parte 1: Regole generali”

Persona autorizzata a costituire il fascicolo tecnico:
....

Il legale rappresentante

Luogo e data

...............(...), ____________________ ______________________________

Fig. 2.1.1: Esempio di Dichiarazione di Conformità.

Dopo aver prodotto la Dichiarazione di Conformità firmata (con struttura simile a quella mostrata in Figura 2.1.1), il fabbricante è tenuto ad apporre il marchio CE.

La normativa specifica i rapporti geometrici delle lettere CE, dove *c* ed *e* devono avere all'incirca la stessa dimensione verticale che non può essere inferiore ai 5 mm (Figura 2.1.2).
Nel caso il dispositivo sia una macchina, deve recare in modo leggibile ed indelebile almeno le seguenti indicazioni:

- nome del fabbricante e suo indirizzo;
- marchio CE con l'anno di costruzione;
- designazione della serie o del tipo;
- eventualmente, numero di serie.

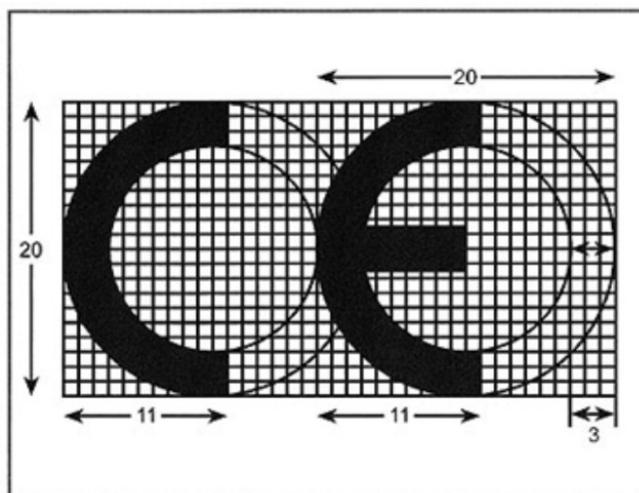



Fig. 2.1.2: Proporzioni del simbolo grafico di Conformité Européenne

2.2 Istruzioni per l'uso

Un' altra parte essenziale di cui il costruttore è tenuto alla stesura è il manuale di istruzioni per l'uso, che costituisce parte integrante della macchina o apparecchiatura e da essa è indissociabile.
Le Direttive descrivono le linee guida per la stesura delle istruzioni per l'uso, le quali devono fornire almeno le seguenti informazioni:

- Riepilogo delle indicazioni previste per la marcatura, escluso il numero di serie, eventualmente completate dalle indicazioni atte a facilitare la manutenzione (ad esempio: indirizzo dell'importatore, dei riparatori, ecc.).
- Le condizioni di utilizzazione previste (uso normale della macchina e uso ragionevolmente prevedibile).
- Il/i posti di lavoro che possono essere occupati dagli operatori.

- Le istruzioni per eseguire senza alcun rischio:
  - la messa in funzione,
  - l'utilizzazione,
  - il trasporto, indicando la massa della macchina e dei suoi vari elementi se devono essere trasportati separatamente,
  - l'installazione,
  - il montaggio e lo smontaggio,
  - la regolazione,
  - la manutenzione e la riparazione.
- Se necessario,istruzioni per l'addestramento.
- Se necessario, le caratteristiche essenziali degli utensili che possono essere montati sulla macchina.
- Qualora necessario vanno indicate le controindicazioni di utilizzazione.
- Devono essere allegati gli schemi della macchina necessari per la messa in funzione, la manutenzione, l'ispezione, il controllo del buon funzionamento e, all'occorrenza, la riparazione della macchina e ogni altra avvertenza utile soprattutto in materia di sicurezza.
- Se necessario vanno indicate le prescrizioni di montaggio volte a ridurre il rumore e le vibrazioni prodotti.
- Indicazioni sul rumore aereo prodotto dalla macchina, valore reale o valore stabilito sulla base di misurazione eseguita su una macchina identica (il fabbricante deve anche indicare le condizioni di funzionamento della macchina durante la misurazione e i metodi di misurazione seguiti):
  - Il livello di pressione acustica continuo equivalente ponderato A, nei posti di lavoro, se supera 70 dB (A); se tale livello è inferiore o pari a 70 dB (A), deve essere indicato,
  - il valore massimo della pressione acustica istantanea ponderata C, nei posti di lavoro, se supera 63 Pa (130 dB rispetto a 20 µPa),
  - il livello di potenza acustica emesso dalla macchina se il livello di pressione acustica continuo equivalente ponderato A nei posti di lavoro supera 85 dB (A) (se è una macchina di grandissime dimensioni si mette solo la pressione acustica continuo equivalente ponderato A per alcuni punti attorno alla macchina.

Se i posti di lavoro non possono essere definiti, la misurazione del livello di pressione acustica deve essere eseguita a 1 m dalla superficie e a 1.60 m di altezza dal suolo o dalla piattaforma di accesso. Devono essere indicati la posizione e il livello della pressione acustica massima.

Inoltre:

- Se è prevista utilizzazione in atmosfera esplosiva, le istruzioni per l'uso devono fornire tutte le indicazioni necessarie.
- La redazione e la presentazione delle istruzioni per l'uso, nel rispetto delle altre esigenze essenziali di cui sopra, devono tenere conto del livello di formazione generale e della perspicacia che ci si può ragionevolmente aspettare dagli utilizzatori.

Altre informazioni vanno aggiunte a seconda della tipologia di macchina, ad esempio i valori delle vibrazioni generate dalla macchina se semovente o portatile o conducibile a mano, piuttosto che le tabelle dei carichi e la definizione ed i mezzi di installazione delle zavorre per macchine destinate al sollevamento ecc.

Le istruzioni per l'uso possono essere in lingua originale, ma con la traduzione nella o nelle lingue del paese dell'utilizzatore finale, e vanno consegnate entrambe le versioni. Mentre per le istruzioni di manutenzione è sufficiente che siano scritte nella lingua compresa dai manutentori.

2.3 Procedura per la verifica della conformità

É vietato produrre, commercializzare, installare, acquisire ed utilizzare apparecchi privi della marcatura CE. É parimenti vietato redigere la Dichiarazione CE di conformità e apporre la marcatura CE senza aver rispettato le procedure descritte dalle Direttive.
Le apparecchiature sono soggette al sequestro qualora vengano immesse sul mercato europeo:

- Sprovviste della Dichiarazione CE di Conformità.
- Sprovviste della marcatura CE.
- Sprovviste dei requisiti delle Direttive applicabili (anche se provvisti della Dichiarazione CE di conformità e della marcatura CE).
- Provviste di altre marcature che si possano confondere con il simbolo grafico della marcatura CE o possano renderlo illeggibile.
- Provviste di marcatura CE con simbolo non conforme a quello descritto nelle Direttive.

Una volta sottoposti a sequestro gli apparecchi potranno essere reimmessi sul mercato soltanto dopo che saranno state eliminate le imperfezioni riscontrate dalle Autorità di controllo (ovvero, per l'Italia, Ministero delle Attività Produttive, Ministero della Salute, Camere di Commercio, Polizia e Guardia di Finanza, Agenzia delle Dogane).

Scaduti i 6 mesi dal sequestro delle merci e dal loro ritiro dal mercato, si passa alla confisca delle stesse.

É inoltre soggetto a sanzioni amministrative chiunque:

- immetta sul mercato, commercializzi, distribuisca o installi apparecchi non conformi ai requisiti di protezione;
- apporti modifiche (anche solo per uso personale) agli apparecchi provvisti di marcatura CE che comportano la mancata conformità ai requisiti di protezione;
- immetta sul mercato, commercializzi, distribuisca o installi apparecchi conformi ai requisiti di protezione ma sprovvisti di marcatura CE;

2.4 Significato e scopo della normazione

Lo scopo dichiarato delle Direttive europee dette di “armonizzazione totale” è quello di favorire la libera circolazione dei beni all'interno dell'Unione Europea attraverso il soddisfacimento di obiettivi definiti da norme comuni, al fine di abbattere le barriere doganali; in altre parole lo scopo è la costituzione di un Mercato Unico Europeo.
Poiché prima che fossero varate le Direttive ciascun Paese possedeva le proprie Leggi Nazionali e di conseguenza le proprie specifiche sui requisiti che dovevano avere i prodotti, si è reso necessario fissare dei requisiti minimi accettati da tutti gli stati membri dell'Unione in ambito di sicurezza per i consumatori.

In particolare la Direttiva EMC è stata varata dall'UE nel 1989 con lo scopo di armonizzare a livello europeo la legislazione sulla compatibilità elettromagnetica dei prodotti tecnici, ed è stata poi convertita in leggi nazionali da ciascuno stato membro. Anche la Direttiva macchine è stata varata nel 1989 e convertita in legge nazionale in ogni paese dell'Unione Europea dal 1° luglio 1995.

2.5 Tipi di norme

In molti settori, e in particolare nel campo dell'elettrotecnica, vigono norme riconosciute a livello internazionale. Questo impegno internazionale ha prodotto qualcosa come 10000 norme internazionali che possono essere applicate direttamente o recepite nei singoli corpi normativi nazionali. Le norme internazionali sono redatte da Organismi Normativi Internazionali:

- **ISO** (International Standardizing Organization): cui partecipano 90 Paesi con i rispettivi istituti di normazione nazionali. Un'esempio sono le norme

internazionali per i sistemi di garanzia della qualità ISO 9000 … 9004.

- **IEC** (International Electrotechnical Commission): è responsabile delle normative elettrotecniche. In questo campo vi è una corrispondenza quasi del 100% con le norme europee armonizzate, come indica in molti casi anche l'identica numerazione.
- **CISPR**(Comitè International Spécial des Perturbations Radioélectriques): è la commissione speciale internazionale per le radiofrequenze. L'obiettivo delle pubblicazioni e delle raccomandazioni del CISPR è quello di contribuire alla protezione contro i radiodisturbi, in particolare per quel che riguarda le metodologie di prova e i valori limite per le radiofrequenze nei prodotti elettrici ed elettronici.

Le norme europee armonizzate sono elaborate dagli enti normativi europei **CEN** (Comitato Europeo di Normalizzazione) e **CENELEC** (Comitato Europeo di Normalizzazione Elettrotecnica) e riconosciute appunto come norme armonizzate. Le direttive (come la direttiva EMC) comprendono una serie di queste norme armonizzate, le quali non sono considerate leggi, ma vengono in ogni caso convertite nelle rispettive leggi nazionali.

Si possono distinguere tre tipi di norme:

- **Norme europee** (EN...)
  Sono da considerarsi leggi e devono essere applicate immutate all'interno della giurisdizione nazionale, comportando il ritiro di altre norme nazionali contrarie.

- **Documenti di armonizzazione** (HD...)
  Sono norme europee promulgate con la medesima procedura delle EN; vi è tuttavia la possibilità, per un periodo transitorio, di variazioni a livello nazionale.

- **Prestandard europeo** (ENV...)
  Sono utili in tutti quei settori ad elevata innovazione tecnologica come quello informatico. Costituiscono un prestandard che dopo un certo periodo di tempo può essere convertito in una Norma Europea

Inoltre, a seconda del campo di impiego, le norme vengono suddivise nei tipi A, B e C:

- Tipo A: **norme generali**
  Descrivono i requisiti generali che tutti i prodotti devono possedere

- Tipo B: **norme di gruppo**
  Descrivono i requisiti che i vari gruppi di prodotti devono possedere; devono essere prese come riferimento nel caso in cui non vi siano norme di prodotto specifiche.

- Tipo C: **norme di prodotto**
  Descrivono i requisiti che i prodotti particolari devono possedere per poter essere commercializzati, hanno priorità sulle norme generali e vanno a completarle senza invalidarle.
  Un esempio di norma di prodotto è la EN 61131 applicabile ai PLC e alle periferiche.

Nella Direttiva EMC, vengono richiamate anche le cosiddette ***norme di base***, che stabiliscono le modalità di prova e le caratteristiche della strumentazione da utilizzarsi durante i test delle apparecchiature (EUT) ai fini della determinazione della compatibilità elettromagnetica.

Anche se nelle questioni di garanzia dei prodotti le norme possono spesso offrire una sicurezza legale, occorre sottolineare che non si tratta di norme giuridiche. Gli organismi di normazione non rispondono all'effettiva applicabilità delle norme. Quest'ultima viene verificata dal costruttore responsabile tramite un'analisi dei rischi, conformemente alle direttive. Solo le prescrizioni di legge vigenti in ciascun singolo stato sono vincolanti.

Norme di prodotto, generiche e di base

Le norme facenti parte della direttiva EMC possono essere suddivise in tre gruppi fondamentali:

- **Norme di prodotto** (o di famiglia di prodotti): definiscono, per ogni tipologia di prodotto o famiglia di prodotti, i limiti di emissione e il livello di immunità dello stesso (ad esempio elettrodomestici, cellulari, computer, elettromedicali).

- **Norme generiche**: nel caso in cui non esistano norme di prodotto specifiche, le norme generiche stabiliscono equivalentemente i limiti di emissione e il livello di immunità delle apparecchiature elettriche ed elettroniche usate in uno specifico ambiente: industria pesante, leggera, uso domestico.

- **Norme di base**: stabiliscono la metodologia, le caratteristiche della strumentazione di prova e la configurazione di base della prova.

Ciò si traduce in pratica nel determinare quali siano le norme applicabili ad un determinato dispositivo sotto test (EUT), norme di prodotto o generiche, le quali stabiliscono dei valori di riferimento in termini di emissioni e immunità; per conoscere invece la modalità di esecuzione delle prove e la strumentazione da utilizzare, vanno prese in considerazione le norme di base.
Queste ultime definiscono inoltre i criteri di prestazione mediante i quali poter valutare il comportamento dei dispositivi sotto test, i quali non devono necessariamente superare pienamente ogni prova prevista dalle norme; infatti i livelli di immunità e il grado di emissione saranno diversi a seconda della natura del prodotto e del luogo (ambiente elettromagnetico) in cui andrà a operare. Le norme definiscono 4 livelli distinti di comportamento dell'EUT e, strettamente parlando, la valutazione finale sarà di tipo qualitativo più che quantitativo; avrà inoltre un valore relativo ai livelli di prova cui è stata sottoposta l'apparecchiatura.

2.6 Le Direttive: Macchine, EMC, LVD

Direttiva Macchine (Direttiva 2006/42/CE)

Il 6 marzo 2010 è entrato in vigore il D.Lgs. 27 gennaio 2010 n.17 che ha recepito la nuova direttiva macchine 2006/42/CE, previa pubblicazione sulla G.U. n. 41 del 19/02/2010, abrogando di conseguenza il precedente D.P.R 459/96.
La Direttiva Macchine è un insieme di norme armonizzate che si applicano alle *macchine*, cioè a manufatti che abbiano almeno una parte in movimento e che non siano mossi esclusivamente dalla forza umana. Lo scopo fondamentale di queste norme è quello di garantire la sicurezza e la salute dell'operatore e vengono presi in considerazione numerosi aspetti progettuali: dall'altezza del piano di lavoro al contrasto di colori tra parti fisse e parti mobili, dall'illuminazione (specialmente dei dispositivi di emergenza oltre che di quelli di controllo) all'emissione di potenza sonora, dai dispositivi di ritenzione di sicurezza ai simboli di avvertimento da applicare sulla macchina, dalla predisposizione dei sistemi di sollevamento della macchina al contenuto informativo della targhetta di identificazione della stessa ecc.

Vengono inoltre esposti principi quali l'intercambiabilità dei componenti, l'ergonomia e la priorità della sicurezza sulle prestazioni e vengono descritte le linee guida per la stesura del manuale di istruzioni e di manutenzione.

Non rientrano nel campo di applicazione della direttiva le macchine

appositamente progettate e costruite a fini di ricerca per essere temporaneamente utilizzate nei laboratori. Sono da escludere inoltre elettrodomestici destinati a uso domestico, macchine ordinarie da ufficio ecc. che rientrano invece nella direttiva LVD. Sono invece soggette alla direttiva gli impianti costituiti da più macchine e i componenti di sicurezza. Esistono però *macchine* che non rientrano nel campo di validità della direttiva, quali sistemi di sollevamento delle persone, armi, impianti nucleari, caldaie a vapore, trattori, dispositivi medici ecc. che presentano dei rischi più specifici e sono per questo regolamentati dalle specifiche direttive di prodotto.

Direttiva EMC (2004/108/CE)

La Direttiva EMC è stata varata nel 1989 con lo scopo di armonizzare la legislazione dei vari stati membri sulla compatibilità elettromagnetica dei prodotti tecnici. Essa comprende un insieme di norme generiche, di prodotto e di base che stabiliscono i requisiti in termini di livelli di emissione e di immunità che un dispositivo elettrico o elettronico deve possedere per poter essere considerato elettromagneticamente compatibile, e poter quindi essere immesso nel mercato europeo.

Direttiva LVD (2006/95/CE)

La Direttiva UE 2006/95/CE sulla sicurezza del materiale elettrico, detta anche Direttiva LVD (Low Voltage Directive) o Direttiva Bassa Tensione, varata per la prima volta nel 1973, si propone di armonizzare nell'Unione Europea i requisiti tecnici di sicurezza per il materiale elettrico nel campo della bassa tensione, sempre allo scopo di eliminare possibili ostacoli al commercio.
La direttiva sulla bassa tensione si applica al materiale elettrico destinato ad essere impiegato ad una tensione nominale compresa tra i 50 e 1000 V in corrente alternata e tra i 75 e 1500 V in corrente continua.
Sono esclusi:

- materiali elettrici da utilizzare in atmosfera esplosiva
- sistemi elettro-radiologici ed elettro-medicali
- componenti elettrici di ascensori e montacarichi
- contatori elettrici

2.7 Come reperire le norme

Le norme armonizzate sono norme le cui fonti vengono pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea (eur-lex.europa.eu ed new.eur-lex.europa.eu). Le direttive UE nel testo originale si possono trovare sul sito della Commissione

Europea, disponibile in ogni lingua europea ufficiale.
Anche sul sito del CENELEC (www.cenelec.eu) è possibile trovare un elenco aggiornato delle norme europee armonizzate per ogni direttiva UE.
Inoltre la G.U. di ogni Paese pubblica i decreti legislativi che recepiscono le Direttive (ad esempio www.gazzettaufficiale.it per la Gazzetta Ufficiale italiana).

Altri siti:

webstore.ceiweb.it **-** il webstore del Comitato Elettrotecnico Italiano
www.certifico.it e www.certificomacchine.it siti dove è possibile reperire testi guida all'applicazione delle direttive e software utili per la stesura del manuale di istruzioni, manutenzione, dichiarazione CE ecc.
www.scribd.com anche qui è possibile reperire alcuni testi delle normative
www.tne.it un altro sito dove sono in vendita norme e *considerando* sulle norme

Capitolo 3

La compatibilità elettromagnetica (EMC)

3.1 Introduzione

La compatibilità elettromagnetica (EMC) è la caratteristica di un apparecchiatura elettrica o elettronica di funzionare correttamente nel proprio ambiente elettromagnetico (immunità) e al contempo di non interferire con il corretto funzionamento di altre apparecchiature elettriche o elettroniche presenti nello stesso ambiente (emissione).

La direttiva 2004/108/CE, detta *Direttiva EMC,* che sostituisce ed abroga la precedente direttiva 89/336/CEE, è un insieme di norme armonizzate che stabiliscono i requisiti minimi che le apparecchiature elettriche ed elettroniche devono possedere per poter essere considerate elettromagneticamente compatibili. Essa deve essere applicata nel caso di apparecchi che possano generare disturbi elettromagnetici o il cui buon funzionamento possa essere pregiudicato da tali disturbi. I requisiti di sicurezza per un apparecchio di questo genere si considerano soddisfatti quando esso risponde alle pertinenti norme europee armonizzate, le quali regolamentano la messa in commercio, l'esposizione e l'esercizio del tipo di prodotto interessato.

Queste norme sono di competenza del CENELEC (Comitè Europeen de Normalisation ELECtrotechnique) con sede a Bruxelles, e spesso derivano da norme internazionali elaborate dal IEC (International Electrotechnical Commitee) con sede a Ginevra, o dal CISPR (Comitè International Spécial des Perturbations Radioélectriques). Il corrispettivo italiano del CENELEC è il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) il cui Comitato tecnico 210 (C.T. 210) si occupa di compatibilità elettromagnetica.
Esiste anche l'UTE (Unione Tecnica dell'Elettricità) con sede a Parigi, membro del CENELEC e dell'IEC.

3.2 Effetti EMI (sulle apparecchiature e sulle persone)

Gli effetti delle interferenze elettromagnetiche su di una apparecchiatura elettrica o elettronica, o su una macchina, o su un impianto possono andare dal semplice disturbo funzionale alla distruzione di una sua parte con conseguente perdita totale della funzionalità. Le norme di base della Direttiva EMC prescrivono le modalità di prova e i criteri per valutare gli effetti delle EMI su di un EUT, e vengono distinte 4 categorie principali (da pesare comunque in relazione all'ambiente in cui l'EUT dovrà poi operare e quindi in base ai livelli di prova):

- A: L'EUT non risente della presenza del disturbo in quanto non si assiste ad alcun minimo malfunzionamento né durante né dopo l'applicazione del disturbo stesso.
- B: L'EUT risente della presenza del disturbo e si può constatare una alterazione del suo funzionamento, la quale cessa in concomitanza con la cessazione del disturbo. Per le apparecchiature dotate di una memoria elettronica, non si deve verificare una alterazione del suo contenuto.
- C: L'EUT viene alterato nella sua funzionalità dal disturbo applicato e, a fine disturbo, necessita di un intervento manuale da parte dell'utente per poter essere ripristinato (reset). Può verificarsi la perdita di dati precedentemente immagazzinati.
- D: L'EUT sottoposto a disturbo perde le proprie funzionalità in modo permanente e per poter essere ripristinato richiede la sostituzione di alcune sue parti o la riprogrammazione.

In tutti i casi un malfunzionamento dell'EUT non deve essere causa di pericolo per l'operatore o per le cose.
Alcuni esempi di malfunzionamento di una apparecchiatura a causa di interferenze elettromagnetiche:

- Una saldatrice ad ultrasuoni che distrugge il PLC di controllo di una macchina.
- Un encoder per motori che invia impulsi non corrispondenti alla reale rotazione del motore.
- Un telefono cellulare resettato a causa di una operazione di saldatura ad arco.
- Casi di citofoni con i quali si poteva sentire radio vaticana.
- Un RTC (Real Time Clock) che può risultare impreciso a causa della progettazione della PCB non conforme alla EMC.
- Una parte di circuito distrutta a causa di una scarica elettrostatica (Figura 3.2.1)

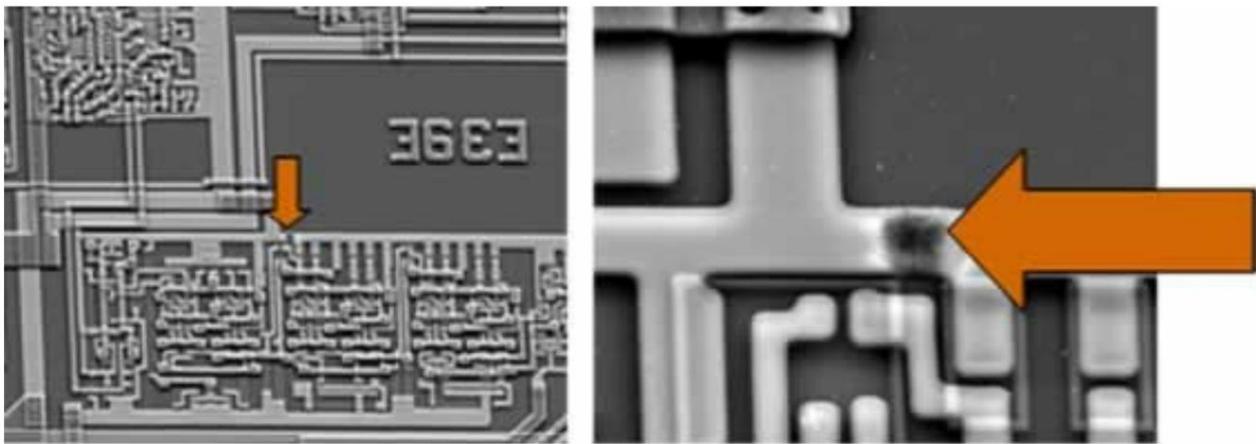



Fig. 3.2.1: Porzione di un componente elettronico danneggiato da una scarica elettrostatica

Per quanto riguarda gli effetti delle EMI sul corpo umano, in questo caso è conveniente parlare, anziché di interferenze elettromagnetiche, di inquinamento elettromagnetico.
Il fenomeno dell'inquinamento elettromagnetico è molto complesso a causa dell'innumerevole quantità di sorgenti e di tipologie di cui si compone, sia in ambito residenziale che in ambito industriale.

Elettrodotti per il trasporto dell'energia, stazioni radio-base per telefonia mobile, saldatrici industriali sono alcuni esempi (in particolare i primi due) di sorgenti di radiazioni elettromagnetiche che senza ombra di dubbio destano preoccupazione nell'opinione pubblica. Prima dell'enorme sviluppo dell'elettronica l'unica fonte di preoccupazioni riguardo gli effetti dei campi elettromagnetici era rappresentata dai tralicci degli elettrodotti, ma ora l'attenzione viene rivolta principalmente alle antenne di trasmettitori di ogni tipo e potenza, le cui radiazioni avvolgono il globo.
Mentre le interferenze elettromagnetiche sulle apparecchiature sono piuttosto evidenti, non altrettanto si può dire sugli effetti che le radiazioni elettromagnetiche provocano, o potrebbero provocare sul corpo umano.
Proprio a causa di questa incertezza, da un lato c'è chi tenta in tutti i modi di dimostrare la pericolosità dell'esposizione alle radiazioni elettromagnetiche (principalmente generate da elettrodotti, trasmettitori RF e telefoni cellulari), dall'altro i produttori fanno il possibile per dimostrare il contrario.

Almeno fino ad ora, non è stata dimostrata la pericolosità delle esposizioni alle radiazioni elettromagnetiche, con livelli di intensità che si riscontrano normalmente nelle condizioni ambientali più comuni. Gli studi fatti in passato al riguardo, sia per gli effetti acuti che per quelli cronici, sono giunti spesso a risultati contrastanti, dettando solo poche certezze relativamente ad effetti acuti

legati ad intensità dei campi molto elevate.

Allo scopo di tutelare comunque la salute delle persone, esistono due tipi di approcci nella definizione dei limiti di esposizione ai campi elettromagnetici:

- i testi Normativi (CEI ENV 50166-1): che considerano solamente gli effetti acuti dei campi elettromagnetici generati nei diversi intervalli di frequenze, e non prendono in considerazione eventuali effetti cronici.
- i testi Legislativi (Legge-quadro 22 febbraio 2001, n.36 ; D.P.C.M 8 luglio 2003) : che considerano precauzionalmente eventuali effetti cronici derivanti dall'esposizione ai CEM (Campi Elettromagnetici)

In entrambi i casi le frequenze considerate vanno da 0 a 300 Ghz

3.3 Modello di interferenza

La descrizione dell'interferenza elettromagnetica tra dispositivi segue un modello di interferenza costituito da sorgente di disturbo, accoppiamento e dispositivo suscettibile (Figura 3.3.1):

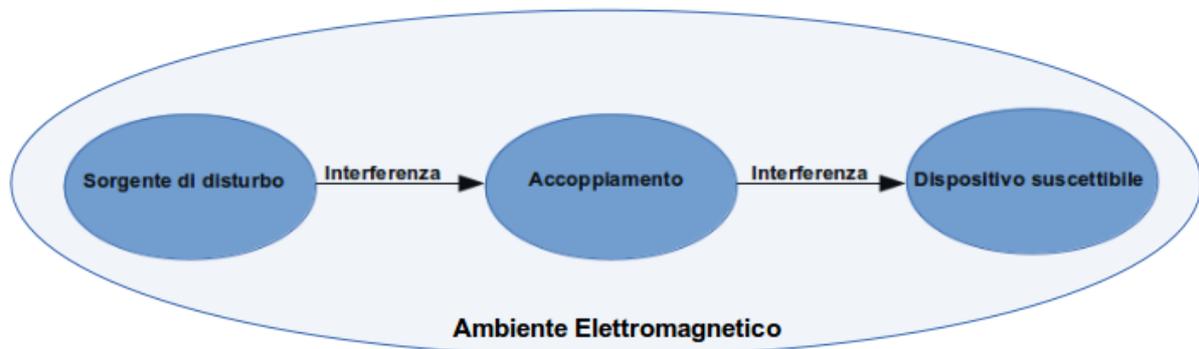



Fig. 3.3.1: Modello di interferenza

Sorgente di disturbo: è ciò che dà origine alle grandezze di disturbo. Le sorgenti di disturbo potenziali sono tutti quei dispositivi in cui si verificano processi di trasformazione elettromagnetica dell'energia. Le sorgenti di disturbo possono trovarsi all'esterno o all'interno del sistema considerato.

Grandezza di disturbo: può essere una tensione o una corrente elettrica, ma anche un campo elettrico o magnetico. Le grandezze di disturbo sono prodotte da processi elettromagnetici, presentano un grande campo di ampiezze e di frequenze con andamenti temporali diversificati e generano nei dispositivi suscettibili anomalie funzionali di varia intensità.

Accoppiamento: l'accoppiamento di grandezze di disturbo sui dispositivi suscettibili può avvenire in diversi modi:

- Galvanico: accoppiamento attraverso un circuito comune
- Capacitivo: accoppiamento attraverso il campo elettrico **E**
- Induttivo: accoppiamento attraverso il campo magnetico **H**
- Interferenza d'onda o irradiata: accoppiamento attraverso il campo elettromagnetico.

Dispositivo suscettibile: si considerano dispositivi suscettibili tutti gli apparecchi o componenti il cui funzionamento subisce l'influenza delle grandezze di disturbo

3.4 Sorgenti di disturbo

Nella pratica risulta utile la seguente classificazione delle sorgenti di disturbo:

- Fonti naturali e tecniche
- Fonti con spettro di frequenze a banda stretta e a banda larga
- Fonti di grandezze di disturbo condotte e irradiate
- Reti di alimentazione come sorgenti di disturbo
- Fonti normali e non intenzionali
- Fonti continue e intermittenti

Sorgenti di disturbo naturali e tecniche
Esempi di sorgenti di disturbo naturali sono: fulmini, rumori di fondo atmosferici e cosmici, scarica dell'elettricità statica. Le sorgenti di disturbo tecniche sono per esempio: sistemi di controllo a tiristori che generano interferenze mediante fronti di corrente ripidi, inserzione e disinserzione di elevate potenze, generatori di alte frequenze, trasmettitori RF, fornaci, oscillatori locali.

Sorgenti di disturbo con frequenze a banda stretta
Le sorgenti di disturbo a banda stretta sono fonti di segnali con frequenze discrete che possono generare considerevoli campi magnetici, soprattutto nelle immediate vicinanze: trasmettitori radio e trasmettitori per radiofonia amatoriale, apparecchi per radiotelefonia, impianti radar, generatori industriali di alte frequenze, apparecchi a microonde, circuiti di corrente, saldatori, ricevitori audio o FX, strumenti a ultrasuoni, circuiti di convertitori di corrente.

Sorgenti di disturbo con frequenze a banda larga
Le sorgenti di grandezze di disturbo condotte e irradiate a banda larga sono le più

problematiche nell'ambito dei sistemi di automazione elettronici, in quanto oltre ad un ampio spettro di frequenze presentano elevatissime parti di frequenze:

- Motori
- Lampade a scarica elettrica
- Interruttori di potenza
- Sezionatori di reti di alimentazione
- Rumori di fondo
- Circuiti di controllo con semiconduttori
- Dispositivi di commutazione (relè, contattori)
- Scarica dell'elettricità statica
- Scariche atmosferiche
- Scariche nucleari

Fonti di grandezze di disturbo condotte

Gli effetti condotti si trasmettono mediante conduttori metallici (cavi o conduttori strutturati), trasformatori, bobine e condensatori. Poiché i conduttori fungono anche da antenne, è possibile convertire una grandezza condotta in una irradiata e viceversa. Alcuni esempi sono:

- Lampade fluorescenti
- Interruttori di rete
- Aspiratori
- In generale tutto ciò che è collegato ad una rete di alimentazione, che può essere considerata come fonte di grandezze di disturbo continue e discontinue

Sorgenti di grandezze di disturbo irradiate

Quando le dimensioni dei componenti sono ridotte rispetto alla lunghezza d'onda delle interferenze irradiate, si possono osservare separatamente gli effetti del campo elettrico e magnetico.
Nel caso di lunghezze d'onda inferiori, e quindi all'aumentare della frequenza, si deve prendere in considerazione il campo elettromagnetico complessivo.
All'aumentare della frequenza, tutti i componenti diventano potenziali fonti di interferenze in quanto fungono da antenna (intenzionale o non intenzionale).

- Circuiti bistabili
- Archi elettrici a commutazione
- Contatti di camme
- Circuiti di commutazione di potenza

Fonti normali e non intenzionali

Rappresentano le fonti di EMI che ci si può ragionevolmente aspettare in un dato ambiente elettromagnetico

Fonti continue o intermittenti
É possibile distinguere tra fonti di interferenze sempre attive e fonti di interferenze attive ad intermittenza. Queste ultime si hanno ad esempio nel caso di disinserzione di ricevitori durante un temporale.

3.5 Grandezze di disturbo

Le grandezze di disturbo sono tensioni **U** e correnti **I**, le quali possono propagarsi per via condotta o essere generate da campi elettrici **E** e magnetici **H** variabili nel tempo, che si propagano a partire dall'elemento disturbatore per irraggiamento.

Le variazioni repentine di tensioni e correnti all'interno dei sistemi elettronici, le quali sono causa di interferenze elettromagnetiche, sono dovute principalmente alla presenza di componenti digitali, la cui velocità di commutazione dipende naturalmente dalla tecnologia impiegata per la loro realizzazione. Ad esempio per quanto riguarda le porte logiche all'interno dei circuiti integrati, il tempo di salita va dai 0.05-0.2 ns per le porte all'arseniuro di gallio (GaAs), ai 6-9 ns delle porte TTL.

I parametri elettrici delle grandezze di disturbo, che determinano l'entità di quest'ultimo, sono:

- **Tempo di salita**: misura la durata della grandezza di disturbo generata; influisce direttamente sullo spettro in frequenza
- **Velocità di variazione δu/δt e δi/δt**: misura l'entità della grandezza di disturbo generata
- **Valore di picco**: misura l'energia dell'impulso di disturbo

Cui si deve aggiungere:

- **Frequenza:** La frequenza è determinante sia per quel che riguarda l'effetto del disturbo (per esempio può produrre una risonanza in tratti di conduttore di una certa lunghezza) sia per quel che riguarda la soppressione dello stesso (per esempio le schermature dei cavi sono poco efficaci al di fuori di un certo range di frequenze, e anche le impedenze dei cavi dipendono dalle frequenze dei segnali che li attraversano, come mostrato in Figura 3.5.1).

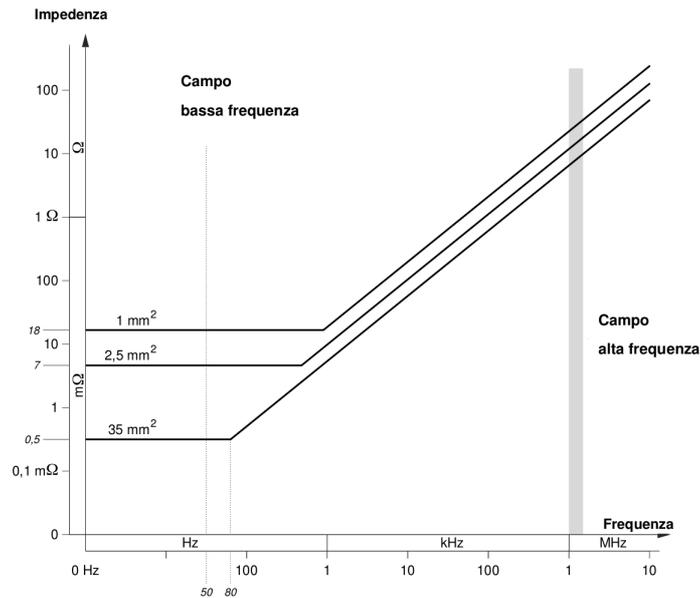



Fig. 3.5.1: Valori caratteristici dell'impedenza di un conduttore elettrico di lunghezza L=1m

Dalla figura si può constatare come:

- L'impedenza del cavo aumenta con la frequenza del segnale che lo attraversa
- Per segnali a bassa frequenza (50-60 Hz) il diametro del cavo influisce sull'impedenza più della lunghezza.
- Per segnali ad alta frequenza (cioè > 5 MHz) ad influire maggiormente sull'impedenza è la lunghezza del cavo, mentre influisce meno il diametro del cavo.

- **Spettro di frequenza**: un impulso di disturbo può essere visto come un impulso rettangolare che si può riprodurre come somma di funzioni sinusoidali. Quanto maggiore è la precisione con cui lo si riproduce, tanto più ripidi sono i fronti d'impulso, e tanto più elevato è il numero di segnali sinusoidali, di diversa frequenza, necessari per approssimarlo, con il risultato di ampliare il suo spettro in frequenza, rendendone più difficile la soppressione. I tempi di commutazione delle tensioni e correnti determinano la ripidità del segnale di disturbo e dunque influiscono direttamente sull'estensione del suo spettro in frequenza.

3.6 Tipi di disturbi elettromagnetici

I segnali di disturbo che derivano dalle grandezze di disturbo riguardano un'ampia gamma di frequenze ed ampiezze e possono essere classificati in base a vari aspetti, come per esempio la loro manifestazione temporale:

- **Andamento periodico**: sono segnali sinusoidali. Esempi di segnali di disturbo periodici esterni sono le emittenti radiotelevisive e di radiotelefonia. Provocano distorsioni costanti della tensione di alimentazione, sbalzi di tensione, cali di tensione e asimmetrie nella rete trifase.

- **Andamento non periodico (transitorio)**: sono impulsi di disturbo di breve durata, e sono per questo detti "transitori". Generalmente provocati da scariche di archi elettrici o scintille di interruttori (anche nei normali processi di commutazione di apparecchi elettrici), sono caratterizzati da rapidissime variazioni della tensione e fluttuazioni della corrente.

3.7 Meccanismi di accoppiamento

La forma e le connessioni degli elementi conduttori di un circuito o di un impianto giocano un ruolo essenziale nel modo in cui un segnale interferente va a sovrapporsi al segnale utile e sul modo in cui quest'ultimo può essere nuovamente separato dal segnale di disturbo. Le vie di propagazione delle interferenze elettromagnetiche sono numerose, come visibile in Figura 3.7.1 .

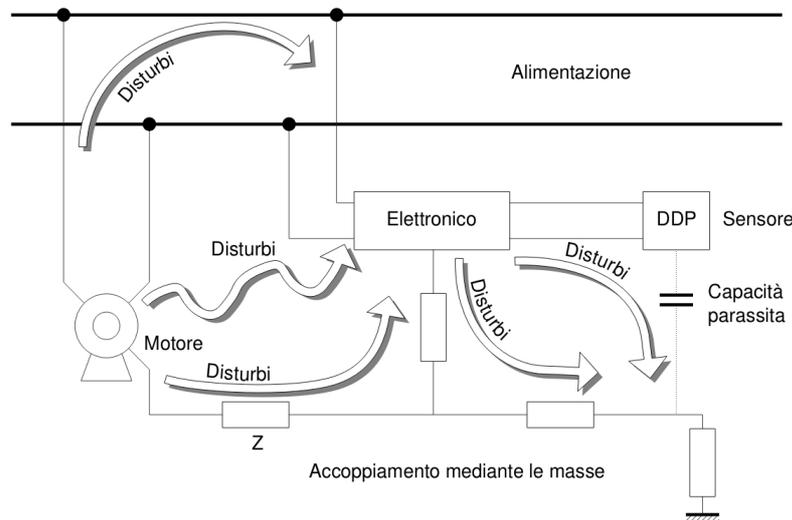



Fig 3.7.1: Vie di propagazione dei disturbi elettromagnetici

Accoppiamento per conduzione (galvanico)

Gli accoppiamenti per conduzione si verificano in presenza di un conduttore elettrico, ovvero quando circuito emettitore e circuito vittima sono tra loro collegati elettricamente mediante:

- linee di alimentazione interne, o esterne come la rete di distribuzione
- cavi di controllo (esempio quelli che comunicano con i sensori)
- cavi di trasmissione dei dati (esempio bus)
- conduttori di protezione (PE, PEN ecc.)
- massa
- terra
- capacità parassite

I segnali di disturbo possono raggiungere il circuito vittima (o suscettibile) principalmente attraverso le sorgenti di alimentazione elettrica e attraverso la massa e la terra.
I conduttori di massa elettronica sono infatti tutti collegati alla massa dell'impianto e quindi alla terra mediante conduttori di impedenza non nulla. Ciò causa l'insorgere di differenze di potenziale tra i vari punti dell'impianto con la conseguente circolazione di correnti parassite.

Se si considera un caso semplice di collegamento bifilare tra 2 circuiti, il segnale di disturbo o parassita può trasmettersi in 3 modi diversi (negli schemi C_p è la capacità parassita) :

- **modo differenziale**: la corrente percorre uno dei conduttori, passa attraverso il circuito vittima, generando eventuali funzionamenti anomali, e in seguito ritorna attraverso l'altro conduttore.

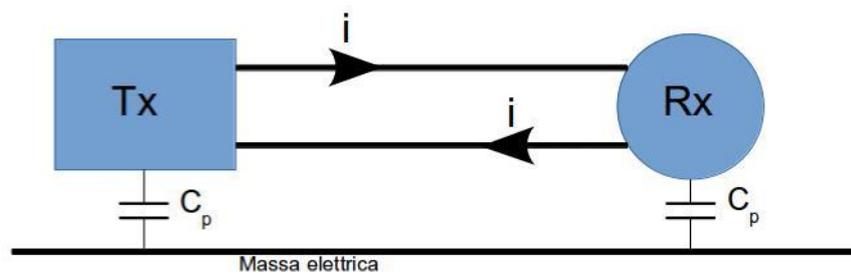



Fig. 3.7.2: Modo differenziale

- **modo comune**: la corrente percorre tutti i conduttori nello stesso senso, e ritorna attraverso la massa tramite le capacità parassite. Questi rappresentano il problema fondamentale dei fenomeni EMC dal momento che il loro cammino di propagazione è difficile da identificare

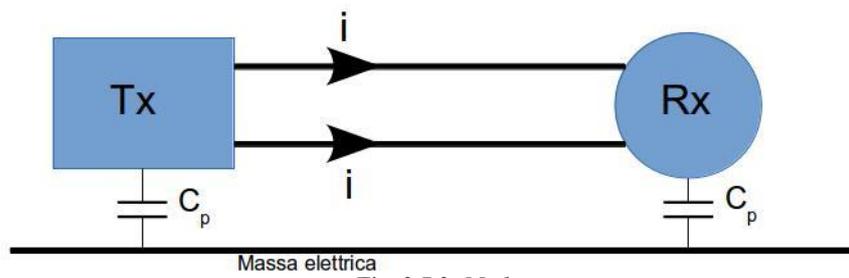



Fig. 3.7.3: Modo comune

- **modo di antenna**: tutti i conduttori (compresa la massa elettrica) sono percorsi da corrente nello stesso senso

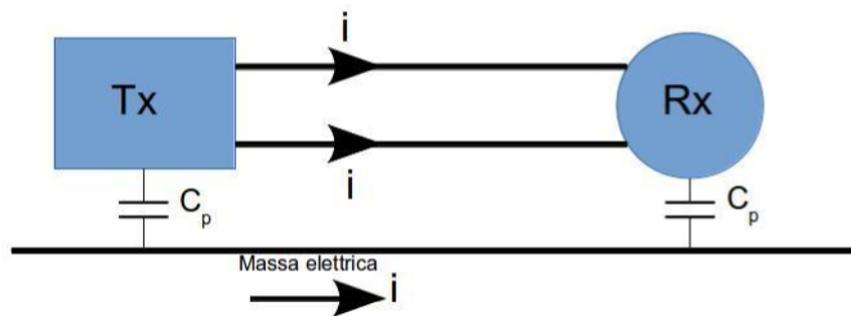



Fig. 3.7.4 – Modo di antenna

Accoppiamento per irraggiamento

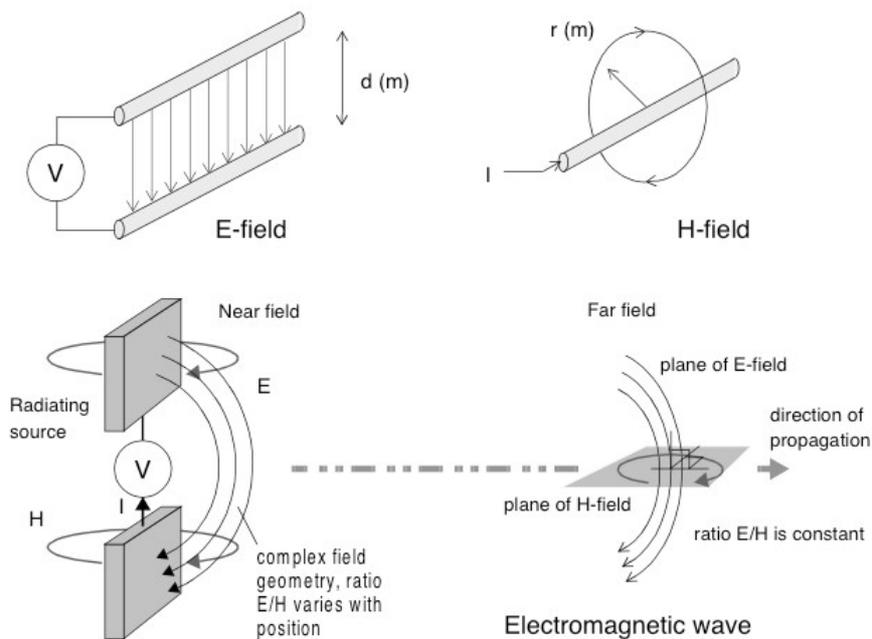



Fig. 3.7.5: Schema della generazione involontaria di campi EM in bassa e alta frequenza

Nella Figura 3.7.5 viene schematizzato il fenomeno della generazione di campi elettrici e magnetici dovuto alla presenza di cariche elettriche accumulate e di cariche elettriche in movimento. Tra due fili a diverso potenziale si genera un campo elettrico (**E**), mentre intorno a un filo percorso da corrente si genera un campo magnetico (**H**).
Quando tra due conduttori sussiste una differenza di potenziale variabile, si verifica in essi un movimento di cariche elettriche in grado di generare al loro volta dei campi magnetici.
Si genera di conseguenza un campo elettromagnetico che si propaga come una combinazione di **E** e **H**.
La distribuzione e l'intensità del campo dipenderanno dalle caratteristiche dei conduttori e dei materiali circostanti.

Gli accoppiamenti per irraggiamento non necessitano di un conduttore elettrico, e si verificano attraverso l'ambiente, con influenza a distanza. In base al tipo di disturbo, gli accoppiamenti per irraggiamento possono essere di due tipi:

- **induttivo**: una corrente i che circola all'interno di un conduttore elettrico crea un campo magnetico attorno al conduttore. Tale fenomeno si manifesta in maniera particolare quando ad operare sono i circuiti di potenza che veicolano forti correnti (>10 A). La corrente i_B, di intensità variabile nel tempo, circolante nel sistema B genera un campo magnetico di intensità variabile, il quale viene intercettato dal circuito del sistema A, dando luogo ad una differenza di potenziale V di valore proporzionale alla mutua induttanza M tra i due circuiti.

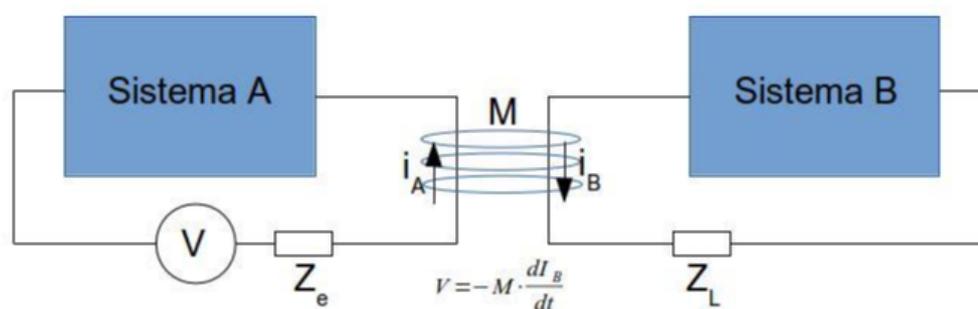



Fig. 3.7.6: Accoppiamento induttivo

- **Capacitivo**: tra due componenti elettrici vicini (circuiti elettrici, cavi, conduttori strutturati) esiste sempre una capacità non nulla. Ciò produce una influenza mutua dei due componenti. Maggiore è la frequenza di variazione del campo elettrico tra i due componenti maggiore è la corrente che si manifesta (le cariche elettriche in realtà si propagano attraverso il comune collegamento a massa)

$$V_{disturbo} = V_A \cdot \frac{j \omega R_{LB} C_{AB}}{1 + j \omega R_{LB} C_{eq}} \qquad C_{eq} = C_{Bp} + C_{AB}$$

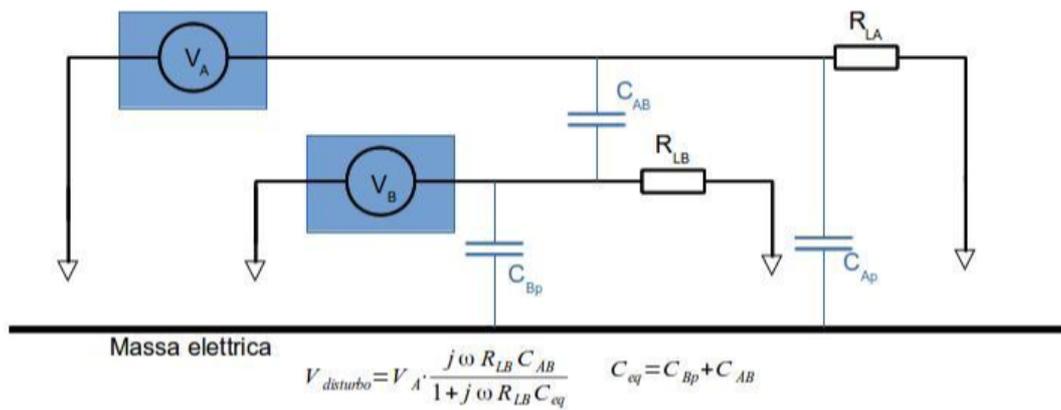



Fig 3.7.7: Accoppiamento capacitivo

Nella Figura 3.7.7, il circuito A interferisce con il circuito B provocando una alterazione della tensione misurabile ai capi di R_{LB}.

Scarica elettrostatica

Quando l'intensità del campo elettrico diventa molto elevata, tanto da superare per intensità la rigidità dielettrica del materiale isolante interposto tra i due sistemi (per l'aria 3 kV/mm), si verifica una conduzione di elettricità (scarica elettrostatica) tra i due componenti elettrici tra i quali sussiste la differenza di potenziale, con il possibile danneggiamento di alcune parti del sistema.

Capitolo 4

L'equipaggiamento elettrico delle macchine in conformità alla EMC

4.1 L'equipaggiamento elettrico di una macchina automatica

Un generico sistema automatico potrebbe essere schematizzato come in Figura 4.1.1:

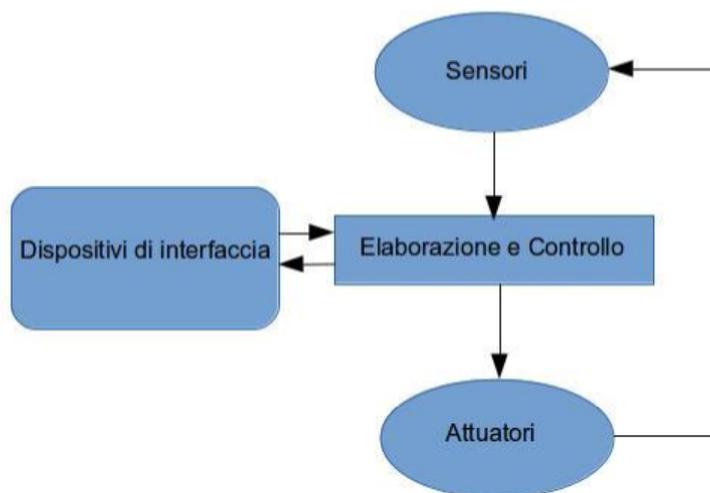



Fig. 4.1.1: Schema di un generico sistema automatico

Elaborazione e controllo

Una macchina automatica, per poter essere definita tale, deve svolgere un compito di complessità più o meno elevata richiedendo un attenzione ridotta o nulla da parte dell'operatore umano.
Allo stato attuale è improbabile trovare macchine automatiche che non montino sistemi di controllo ed elaborazione elettronici (forse qualche vecchia lavatrice potrebbe montare ancora timers di tipo elettromeccanico per la gestione del ciclo

di lavaggio).
Un tipico sistema di controllo è il PLC, un elaboratore elettronico molto versatile che può essere riprogrammato per ottenere diverse funzioni a seconda del compito che dovrà svolgere la macchina.
Tuttavia il PLC da solo non è sufficiente. Per ridurre i costi e per consentire il massimo potere decisionale da parte del tecnico elettricista, il PLC si presenta essenzialmente come una scatola (che può presentare un piccolo display LCD o semplicemente dei led indicatori) con morsetti di ingresso e di uscita, che deve essere però alimentato, e collegato ad altri dispositivi per il controllo di potenza che a loro volta andranno a pilotare gli attuatori. Infatti, le potenze che un PLC può commutare da solo sono modeste (intorno ai 50-100 W per uscita) e questo per motivi di spazio, costo, e per questioni legate alla compatibilità elettromagnetica come verrà descritto più avanti. Di fatto il PLC risulta economicamente vantaggioso solo nel caso di macchine prodotte in poche unità. Nel caso di produzione in serie può essere invece conveniente progettare schede dedicate, con il numero e il tipo di componenti elettronici più adatti per la specifica applicazione.

Sensori

Esistono i più svariati tipi di sensori, che servono per permettere al PLC di “leggere” lo stato del mondo fisico e prendere le opportune decisioni; i sensori che si incontrano più spesso nella produzione di macchine per l'industria sono:

- Sensori induttivi per rilevare la presenza di conduttori, principalmente metalli (pare siano di gran lunga quelli più utilizzati nel settore dell'automazione).
- Sensori reed da montare sui cilindri pneumatici o idraulici, per rilevare la posizione dello stelo (ciò che viene rilevato in realtà è la posizione del magnete montato in prossimità del pistone).
- Encoders per rilevare la rotazione dei motori
- Sensori capacitivi che rilevano la presenza di un oggetto entro una piccola distanza
- Sensori ottici (ne esistono svariati tipi appartenenti a tre categorie principali: a barriera, reflex o a diffusione)
- Termistori e termocoppie per rilevare la temperatura
- Semplici interruttori meccanici

Attuatori

Alle uscite di un PLC possono essere collegati piccoli carichi, prevalentemente induttivi o resistivi:

- Relè elettromeccanici o allo stato solido
- Elettrovalvole
- Inverters

Mentre gli attuatori di grossa potenza, non direttamente controllati da PLC sono:

- Motori elettrici
- Resistenze elettriche
- Cilindri pneumatici ed idraulici

Dispositivi di interfaccia

Potrebbero essere visti come un tipo speciale di sensore, e servono per permettere all'operatore di interagire con la macchina, per esempio:

- Pulsanti
- Joystick
- Display (sempre più spesso di tipo touch)

4.2 Esempio di macchina industriale

Un esempio di semplice macchina automatica, della quale ho seguito la progettazione e realizzazione durante il mio stage, è la seguente:

Fig. 4.2.1: Modello 3D della macchina per smussare flange

Si tratta di una macchina automatica avente la funzione di smussare il foro centrale di flange in acciaio inossidabile per tubi.
A bordo macchina è presente un piccolo quadro elettrico entro cui sono inseriti il PLC, l'inverter, gli 8 relè necessari per il controllo delle elettrovalvole, i trasformatori, ecc. Sullo stesso quadro sono fissati il touch screen da 4”, il pulsante di emergenza e l'interruttore di sicurezza.
Il quadro al suo interno si presenta come nella figura seguente:

Fig. 4.2.2: Quadro elettrico della macchina

Osservando l'immagine 4.2.2, potrebbero essere già notate alcune soluzioni non del tutto felici dal punto di vista EMC, come la connessione delle masse struttura tra loro esclusivamente mediante il cavo verde-giallo, non adatto per le alte frequenze (AF) a causa dell'alta impedenza, o come le canaline per i cavi in materiale plastico, la cui efficacia schermante nei confronti delle interferenze elettromagnetiche (EMI) è nulla.
Altre misure anti-EMI potevano essere implementate, secondo le linee guida generali elencate peraltro in questa tesi.
É da sottolineare comunque il fatto che nonostante alcuni aspetti progettuali di questo quadro non fossero conformi alle migliori regole costruttive secondo lo stato attuale dell'arte in ambito EMC, la macchina non ha mai manifestato problemi riconducibili ad EMI, pur funzionando in un ambiente elettromagnetico industriale leggero (cioè con un certo grado di interferenze elettromagnetiche). Ci si potrebbe allora domandare se valga o non valga la pena prendere in considerazione la EMC nella progettazione. Si tenterà di dare una risposta a questa domanda nel seguito.

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla sicurezza elettrica, al dimensionamento dei cavi, ai dispositivi di sicurezza obbligatori ecc. che devono essere montati dentro un quadro di quel tipo: sono numerosi e importanti. Sono riportate qui di seguito alcune delle norme (numerose) cui fare riferimento:

Tab. 4.2.1: Norme di riferimento per sistemi elettrici

Norme che definiscono i requisiti per la sicurezza elettrica	
HD 384.4.41 o IEC 60364-4-41	Installazioni elettriche di edifici – Parte 4: Misure di sicurezza Capitolo 41: Protezione dalla scossa elettrica
EN 61140 o IEC 61140	Protezione dalla scossa elettrica, requisiti comuni per gli impianti e i loro componenti
EN 60204-1 o IEC 60204-1	Sicurezza delle macchine – equipaggiamento elettrico delle macchine
EN 50310	Applicazione di misure per la compensazione del potenziale e la messa a terra negli edifici con dispositivi di tecnica informatica
EN 50174-1	IT – installazione di cavi di comunicazione – parte 1: Specifiche e garanzia della qualità
DIN EN 50174-2	IT – installazione di cavi di comunicazione – parte 2: Pianificazione e modalità di installazione all'interno degli edifici
IEC 62103 ed EN 50178	Apparecchiature elettroniche per l'utilizzo in impianti elettrici

Essenzialmente, l'assiemaggio dei vari componenti all'interno di un quadro elettrico deve prima di tutto rispondere a criteri di sicurezza per l'operatore elettricista e/o manutentore di carattere più “macroscopico”:

- pericolo di scossa elettrica → protezione mediante collegamento al conduttore di protezione e/o isolamento elettrico
- pericolo di cortocircuito → protezione mediante separazione o interdizioni
- pericolo di incendio → protezione mediante prevenzione antincendio, scelta di materiali non combustibili, contromisure atte a circoscrivere i casi di incendio ecc.
- pericolo dovuto al calore (cioè pericolo di lesioni in seguito al contatto con parti surriscaldate) → utilizzo di protezioni individuali (guanti, occhiali, scarpe antinfortunistiche)
- pericolo da radiazioni (cioè pericolo di emissioni di radiazioni come onde acustiche, infrarossi, luce visibile e coerente ad alta intensità, raggi ultravioletti e ionizzanti ecc.) → protezioni individuali
- pericolo chimico (dovuto al contatto con prodotti chimici pericolosi) → protezioni individuali

Quindi, supponendo che un generico quadro elettrico soddisfi ai requisiti essenziali di sicurezza di cui sopra, si vogliono ora prendere in considerazione

anche gli aspetti riguardanti la EMC (naturalmente gli aspetti della sicurezza e della EMC non sono completamente disgiunti).

Un primo fondamentale aspetto è il seguente:

L'assiemaggio di componenti elettromagneticamente compatibili non è, da sola, condizione sufficiente per comportare la compatibilità elettromagnetica dell'intero sistema.

Infatti nulla vieta che la presenza contemporanea di più dispositivi conformi alla EMC (se presi singolarmente e in un certo ambiente) produca un effetto di degradazione della EMC una volta che questi operino a breve distanza l'uno dall'altro.

Da ciò si può concludere in effetti che l'aspetto della EMC va curato ad ogni "livello" costituente il sistema, e non soltanto a livello di scheda elettronica o dell'intero impianto. Naturalmente questo non deve essere necessariamente fatto dalla stessa persona (per esempio il tecnico elettricista compra il PLC e si aspetta che questo sia di elettromagneticamente compatibile, e vuole occuparsi soltanto della progettazione a livello di quadro o armadio elettrico). Dunque ne deriva una prima regola fondamentale:

1. **L'approccio EMC deve essere globale**
   Il corretto funzionamento si basa su di una corretta progettazione, scelta e realizzazione di tutti gli elementi del sistema, ad ogni livello.

Di seguito viene descritto il modello teorico della progettazione in conformità alla EMC.

4.3 La pre-conformità e la modalità di esecuzione delle prove

Pre-conformità

Affinché un prodotto soddisfi pienamente ai requisiti essenziali delle direttive, con particolare riferimento alla EMC, è necessario che il progettista integri questi requisiti all'interno del progetto fin dalle prime fasi di sviluppo.
Ciò risulta molto utile per evitare di ricorrere ad accorgimenti così detti "di peso", necessari in genere quando ormai risulta troppo costoso modificare il

progetto o addirittura quando il prodotto è già ultimato.
La Figura 4.3.1 schematizza la procedura di progettazione con criteri EMC:

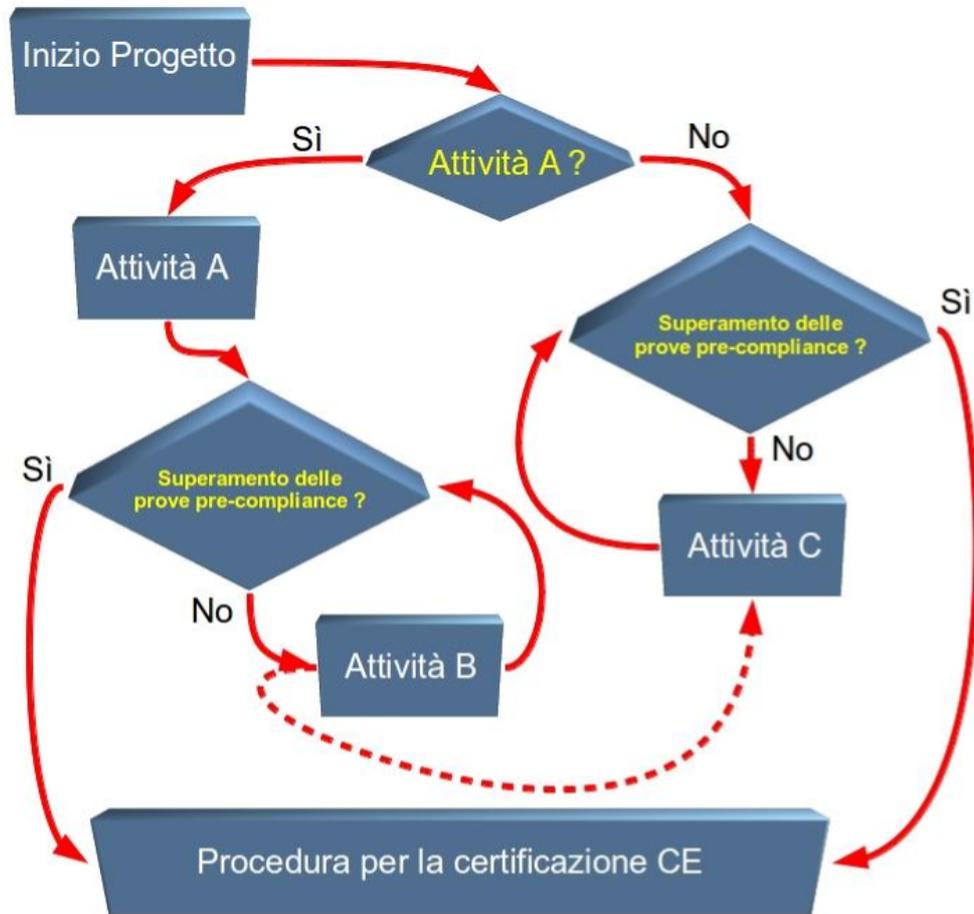



Fig. 4.3.1: Procedura applicativa di progettazione con criteri EMC

Significato dei blocchi in figura:

- **Attività A**: consiste nell'applicazione in termini di scelta e dimensionamento di alcuni (iniziando da quelli a "costo zero") degli accorgimenti conosciuti ai fini del soddisfacimento dei requisiti essenziali della EMC .
- **Attività B**: viene svolta dopo l'attività A e consiste nella verifica del soddisfacimento dei requisiti della direttiva (con opportuni margini di sicurezza) mediante prove pre-compliance.

Le prove vengono tipicamente effettuate su prototipi e in questa fase possono essere ottimizzati alcuni parametri scelti durante l'attività A. L'ottimizzazione dei parametri va effettuata secondo un certo ordine: se si

torna a considerare il modello di interferenza schematizzato in Figura 3.3.1, si può ricavare la seguente regola:

2. **Lavorare da sinistra a destra, nel tentativo di migliorare gli aspetti legati alla EMC, ovvero:**
   a. **Sopprimere l'emissione indesiderata operando sulla sorgente del disturbo**
   b. **Rendere il fenomeno di accoppiamento il meno efficiente possibile**
   c. **Rendere il ricevitore meno suscettibile all'interferenza**

- **Attività C**: consiste nella scelta, dimensionamento e applicazione di accorgimenti di peso per completare quanto non è stato possibile effettuare nelle attività B ed A. É da notare il fatto che non sempre i problemi di compatibilità sono di facile soluzione e, a volte, per risolverne qualcuno se ne creano degli altri, con il rischi di innescare un circolo vizioso che non porta alla soluzione del problema.

Se ne ricava un'altra regola:

3. **Considerare la compatibilità elettromagnetica a partire dalla fase di progettazione**
   Questo approccio rappresenta la migliore garanzia contro funzionamenti anomali e costi imprevisti.

Sulla base delle regole appena descritte, è già possibile rispondere alla domanda se sia conveniente prendere in considerazione gli aspetti progettuali legati alla EMC: conviene attuare immediatamente gli accorgimenti che non comportano un aumento dei costi (per esempio curando il layout dei vari elementi), per poi verificare se tali accorgimenti sono sufficienti mediante prove di pre-compliance. Se tutto va bene, non sarà necessario ricorrere ad altri accorgimenti (es. canaline in metallo). Se invece si riscontrassero dei problemi, si procederà secondo quanto schematizzato nella Figura 4.3.1.

Di conseguenza, riguardo l'esempio precedente di quadro elettrico di bordo macchina, non avendo la macchina mostrato problemi di funzionamento causati da EMI, non si può dire che le scelte del progettista fossero sbagliate. Ciò che è cruciale, è che le scelte del progettista fossero consapevoli e che egli sapesse come intervenire nel caso si fossero verificati dei problemi.

Modalità di esecuzione delle prove

Per quanto riguarda le modalità di esecuzione delle prove, spesso le aziende decidono di affidarsi ad Organismi noificati per eseguire i test sulla compatibilità elettromagnetica. Tali Organismi notificati dispongono di apparecchiature di misura adatte e di laboratori accreditati, eliminando la necessità da parte di aziende medie e piccole di sobbarcarsi i costi per la realizzazione di siti di prova, che possono essere in alcuni casi anche molto grandi, come illustrato in Figura 4.3.2.

Fig. 4.3.2: Camera anecoica per l'effettuazione delle prove di EMC

Risulta conveniente inoltre avvalersi della possibilità offerta da alcuni Organismi notificati di effettuare non una vera e propria procedura per la certificazione CE, ma un insieme di prove del tutto analoghe che hanno però lo scopo di verificare, ancora in fase di progetto (fase B) e su un prototipo, il soddisfacimento dei requisiti essenziali, con valore di test di pre-conformità. In questo modo i progettisti possono, se necessario, intervenire sul progetto tempestivamente e modificare alcuni parametri ritenuti determinanti per poi ritentare i test di pre-conformità. Questo modo di procedere riduce notevolmente i costi, soprattutto nel caso in cui sia prevista una produzione in serie dell'apparecchiatura.

Un'altra possibilità per effettuare le prove di pre-confomità, da parte dell'azienda costruttrice, è quella di dotarsi di alcuni strumenti relativamente economici che permettono di ottenere informazioni qualitative sulle emissioni e sulla suscettività del prodotto:

- Analizzatore di spettro (Figura 4.3.3): è uno strumento di misura selettivo in frequenza che permette di analizzare la composizione spettrale di un

segnale emesso, cioè la distribuzione dell'energia del segnale in frequenza.

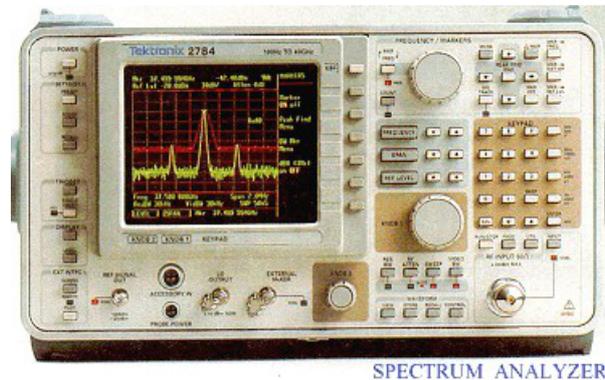



Fig. 4.3.3: Analizzatore di spettro

- La cella GTEM: è un ibrido tra una camera anecoica e una cella TEM e può essere utilizzata su una banda molto ampia di frequenze (Figura 4.3.4)

Fig. 4.3.4: Cella GTEM

É importante notare il fatto che nel tentativo di migliorare le prestazioni EMC di un dispositivo si rischia a volte di peggiorare la situazione. Si può fare la seguente constatazione:

4. Non esistono soluzioni miracolose né verità universali in materia EMC
Questo è vero sia per quel che riguarda il numero di accorgimenti implementati, sia per quel che riguarda il tipo di accorgimenti implementati.

Ad esempio, nel caso delle PCB (Printed Circuit Board), risolvere il problema di emissione di un dispositivo, rendendo meno ripidi i fronti di salita dei segnali, può comportare un aumento della sua suscettibilità (in quanto il segnale impiega un tempo maggiore per raggiungere un certo livello di tensione e quindi si verificheranno maggiori commutazioni spurie causate da interferenze) .
Ciò che si può ottenere applicando le regole dell'arte in materia EMC, è la più alta probabilità di conseguire la compatibilità elettromagnetica del sistema.

Di seguito vengono descritti tutti gli aspetti/accorgimenti relativi alla EMC di vasta applicabilità.

4.4 Interfacce elettriche e meccaniche

Innanzitutto è conveniente considerare quelle che potrebbero essere viste come le “porte” di ingresso e uscita delle EMI in un generico sistema elettrico/elettronico, e che costituiscono quindi le parti vulnerabili dello stesso: si tratta delle interfacce elettriche e meccaniche.

Le interfacce elettriche sono vie attraverso le quali le interferenze elettromagnetiche possono propagarsi dall'esterno all'interno del sistema elettrico/elettronico e viceversa.
Alcuni esempi sono:

- Linee di ingresso per l'alimentazione
- Linee dati input/output
- Massa struttura
- Collegamento di protezione (PE)
- Massa di riferimento di segnale
- Accoppiamenti capacitivi ed induttivi
- Schermatura e fessure

Le interfacce meccaniche invece possono essere intese come tutti quei dispositivi utilizzati per ottenere una massa struttura ideale, inclusi i collegamenti e le giunzioni. Esse sono realizzate mediante:

- Collegamenti diretti (bond diretto): è un collegamento realizzato in maniera permanente mediante bulloni, saldatura, chiodatura o guarnizioni conduttive opportunamente fissate.
- Collegamenti indiretti (bond indiretto): è un collegamento realizzato mediante bandelle metalliche fissate alle estremità mediante tecniche di

bond diretto.

Dalla descrizione di cui sopra si può dedurre che, poiché tali interfacce sono necessariamente presenti (anche non tutte quante insieme) in un qualunque sistema, non è proprio possibile eliminare completamente tali vie di propagazione dei disturbi elettromagnetici.
Tuttavia ciò che interessa realmente è che i livelli di emissione e suscettibilità si mantengano al di sotto di una certa soglia (il dispositivo dovrà funzionare adeguatamente nell'ambiente previsto di destinazione).

4.5 La massa elettrica

La massa elettrica, detta grounding negli Stati Uniti o earthing nel Regno Unito, è una parte circuitale importante avente tipicamente la funzione di riferimento (per definizione a 0 V) per tutte le tensioni presenti all'interno del dispositivo, apparecchio o sistema. La progettazione del sistema di massa elettrica è un'operazione complessa con ricadute notevoli sulla compatibilità elettromagnetica, oltre che sulla funzionalità e sulla sicurezza; questo perché rappresenta la via preferenziale attraverso la quale possono propagarsi eventuali disturbi.

Si possono distinguere 3 categorie principali di massa, schematizzate nella Figura 4.5.1:

- **massa di alimentazione**: è il conduttore di ritorno dell'alimentazione

- **massa struttura**: è la struttura metallica dell'apparato, comprendente il telaio e l'eventuale involucro metallico.

- **massa di riferimento di segnale (srg)**: è la parte circuitale a bassa impedenza predisposta per consentire ad una corrente di segnale di ritornare alla sorgente da dove è partita.

In aggiunta si parla di **massa per la sicurezza elettrica (PE):** è il conduttore di terra cui deve essere collegata la massa struttura se accessibile dall'esterno (per motivi legati alla sicurezza)

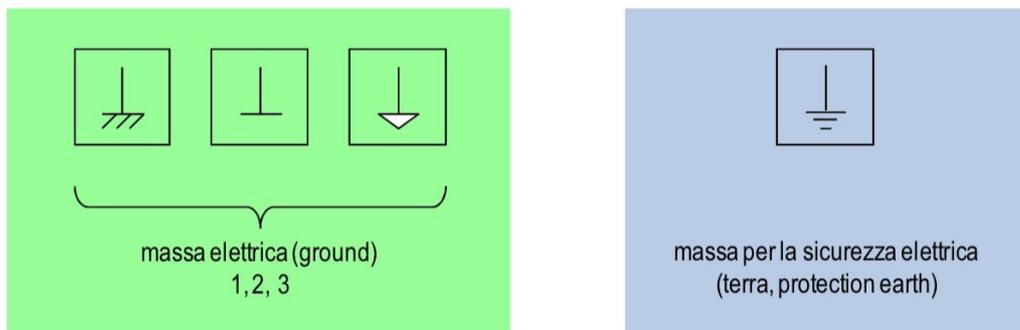



Fig. 4.5.1: Simboli utilizzati per indicare la massa elettrica

Per quel che riguarda il collegamento delle varie masse tra loro, e con le altre parti del dispositivo, si possono ricavare le seguenti regole generali:

5. **Tenere sempre separate la massa di alimentazione e la massa struttura**
   Ciò permette di ridurre l'influenza delle correnti di modo comune. La separazione può avvenire attraverso trasformatori di isolamento (nel caso di alimentazione AC), oppure attraverso i trasformatori già presenti negli alimentatori AC-DC o nei DC-DC.

6. **Tenere sempre collegate la massa di riferimento di segnale e la massa struttura**.
   Questo consente di ridurre le interferenze elettromagnetiche interne ad alta frequenza tra parti circuitali diverse di un sistema. É possibile anche realizzare questo collegamento mediante condensatori, in modo da ridurre le interferenze dovute alle correnti di modo comune in BF e al contempo ridurre le interferenze elettromagnetiche in AF.

Prescindendo da queste due regole generali, si distinguono quattro modalità di collegamento a massa delle apparecchiature elettriche presenti nel sistema:

- **FG (Floating Grounding)**: consiste nell'isolare la massa di riferimento di segnale dall'involucro del sistema sia alla sorgente sia al carico.

Vantaggi:

- isolamento del circuito da eventuali disturbi presenti sulla massa struttura
- possibilità di garantire una barriera metallica ottimale, schermando interamente la struttura Tx-cavo-Rx (con l'impiego di un cavo schermato con connettori schermati)

Svantaggi:

- i circuiti interni sono fuori massa, con possibilità di accumulo di cariche elettriche a potenziali elevati e conseguenti scariche elettriche.

- Maggiore suscettibilità dei circuiti alle interferenze elettromagnetiche in AF tra circuiti interni

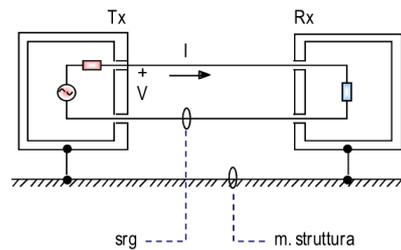



Fig. 4.5.2: Floating grounding

MPG (Multiple Point Grounding): consiste nel collegare la massa di riferimento di segnale di ogni apparato all'involucro e alla struttura del sistema, utilizzando quest'ultima come ritorno delle correnti.
Vantaggi:

- minor numero di conduttori e quindi minor peso, minor ingombro e minore complessità
- possibilità di garantire una barriera metallica ottimale, come per il FG
- riduce le interferenze elettromagnetiche in AF tra le parti del sistema
- impedisce l'accumulo di cariche elettriche

Svantaggi:

- eventuali cadute di tensione sulla massa struttura, dovute a correnti esterne circolanti su quest'ultima, si sovrappongono alla tensione ricevuta da Rx creando interferenza

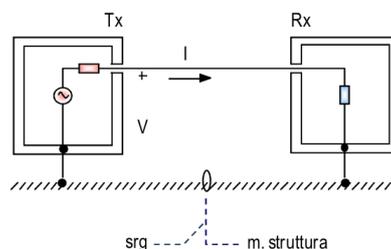



Fig. 4.5.3: Multiple point grounding

SPG (Single Point Grounding): consiste nel collegare la massa di riferimento di segnale di tutti gli apparati ad un singolo punto centralizzato del sistema (esistono diverse configurazioni di SPG, come quella a “stella” e ad “albero”).
Vantaggi:

- isolamento del circuito da eventuali disturbi presenti sulla massa struttura
- riduce le interferenze elettromagnetiche in AF tra le parti del sistema
- impedisce l'accumulo di cariche elettriche che provocano conseguenze negative

Svantaggi:

- lunghezza elevata dei collegamenti necessari e quindi maggior peso, ingombro e complessità
- maggiori capacità parassite tra i collegamenti di massa e la massa struttura, che alle AF trasformano il sistema da SPG a MPG
- maggiore probabilità che i singoli conduttori risuonino trasformandosi in antenne riceventi o trasmittenti non intenzionali
- impossibilità di realizzare una barriera metallica ottimale a causa dei fili di massa che penetrano nell'involucro dell'apparato

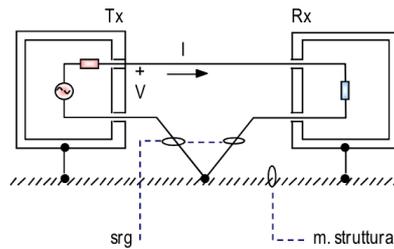



Fig. 4.5.4: Single point grounding

DSPG (Distributed Single Point Grounding): consiste nel collegare la massa di riferimento di segnale del Tx e del Rx alla massa struttura e nell'utilizzare come interfacce di ingresso e di uscita circuiti bilanciati differenziali ad alto rapporto di reiezione di modo comune. Questo pare essere il metodo di grounding migliore, poiché combina i vantaggi di SPG ed MPG.
Vantaggi:

- elevata immunità alle correnti di disturbo presenti sulla massa struttura, che migliora quanto più il sistema è bilanciato
- possibilità di garantire una barriera metallica ottimale
- riduce le interferenze tra i dispositivi del sistema alle AF
- impedisce l'accumulo di cariche elettriche

Svantaggi:

- le interfacce bilanciate richieste incrementano il numero dei fili e la complessità circuitale

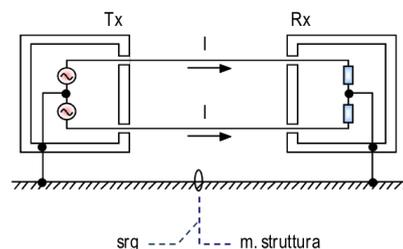



Fig. 4.5.5: Distributed single point grounding

In un quadro elettrico di bordo macchina, al fine di garantire l'equipotenzialità

delle masse, è necessario che sia presente una piastra sul fondo dello stesso avente funzione di piano di massa.
É necessario inoltre preoccuparsi di verificare che non siano presenti vernice o rivestimenti isolanti di altra natura che impedirebbero alle correnti elettriche di propagarsi.
Tutte le masse metalliche dei componenti e degli elementi montati all'interno dell'armadio devono essere imbullonate direttamente sulla piastra del piano di massa per garantire un contatto metallo/metallo durevole e di qualità.
Il cavo di terra verde-giallo, come è stato detto precedentemente, non può in genere assicurare un collegamento di qualità alla massa in AF a causa della sua lunghezza eccessiva (che ne determina una impedenza elevata).

7. **Garantire l'equipotenzialità in bassa e alta frequenza delle masse**
   L'equipotenzialità andrebbe garantita non solo localmente a livello di macchina o impianto, ma anche a livello di "sito", mediante una rete di massa specifica adatta.
   A livello di macchina l'equipotenzialità si ottiene mediante "magliatura" di tutte le masse, ovvero collegando tra loro tutte le strutture metalliche, intelaiature, conduttori di massa, ecc.
   Le connessioni devono essere dirette (ossia metallo contro metallo con collegamento bullonato) oppure mediante trecce in metallo o qualsiasi altro collegamento largo e corto.

4.6 Collegamento a terra del neutro e delle masse

Il collegamento a terra è la messa a terra il cui scopo principale è la sicurezza delle persone, e funziona impedendo che si verifichi una scossa elettrica a seguito di un contatto indiretto, ovvero a seguito del contatto con parti che in conseguenza di un guasto (ad esempio a causa di una falla nell'isolamento di base) sono soggette a tensioni pericolose.

Neutro: è il conduttore che serve da ritorno per la corrente che arriva al carico tramite il conduttore di fase, nei sistemi monofase; mentre serve da ritorno per la corrente di squilibrio del sistema trifase.

I collegamenti a terra (regime di neutro) nei sistemi a corrente alternata trifase e monofase possono essere riassunti in tre categorie (IEC 60364):

- **TT** il neutro e e le masse sono direttamente collegati a terra, con due impianti di terra indipendenti.

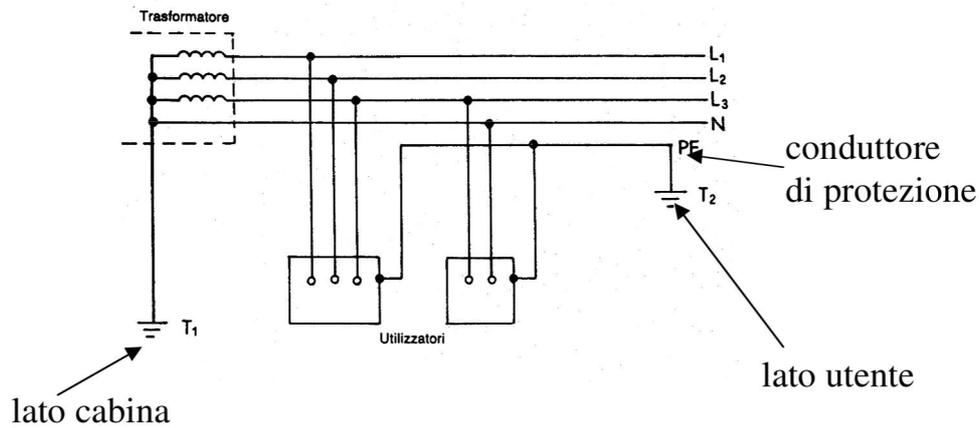



Fig. 4.6.1: Schema TT

- **TN**
  1. **TN-C** il neutro è direttamente collegato a terra mentre le masse sono collegate al conduttore di neutro, e neutro e protezione sono ottenute con lo stesso conduttore

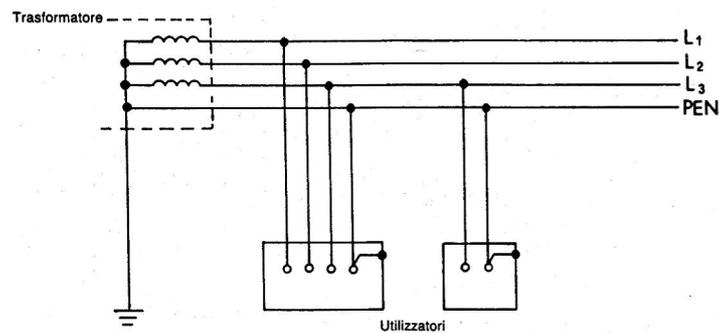



Fig. 4.6.2: Schema TN-C

  2. **TN-S** il neutro è direttamente collegato a terra mentre le masse sono collegate al conduttore di neutro e neutro e protezione sono ottenute con conduttori diversi collegati

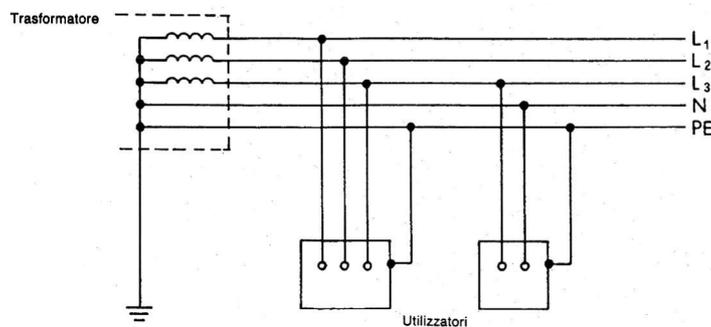



Fig. 4.6.3: Schema TN-S

3. **TN-C-S** sono presenti sia sezioni TN-C sia sezioni TN-S

- **IT** il neutro è collegato a terra con una impedenza (eventualmente di valore infinito) mentre le masse sono collegate a terra con il conduttore di sicurezza

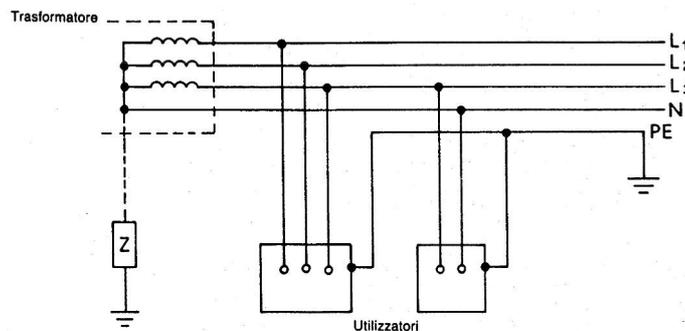



Fig. 4.6.4: Schema IT

Le sigle hanno il seguente significato:

- prima lettera: situazione del neutro rispetto alla terra:
  - T: collegamento diretto del neutro alla terra
  - I: collegamento del neutro alla terra mediante impedenza elevata (o assenza di collegamento)

- seconda lettera: situazione delle masse rispetto alla terra:
  - T: collegamento diretto delle masse ad una terra distinta
  - N: collegamento delle masse e del neutro ad una stessa terra.

Tab 4.6.1: Comportamento in EMC dei regimi di neutro

	Sicurezza delle persone	**Sicurezza dei beni (rischi di incendio, rischi per i materiali)**	**Disponibilità dell'energia**	**Comportamento in EMC**
TT	Corretto[1]	Corretto	Corretto	Corretto[2]
TN-C	Corretto[3]	Non corretto[4]	Corretto	Non corretto[5]
TN-S	Corretto[3]	Non corretto[6]	Corretto	Molto corretto[7]
IT	Corretto[3]	Corretto[8]	Molto corretto	Non corretto[9]

[1] Interruttore automatico differenziale obbligatorio (il cosiddetto “salvavita”)
[2] Il PE non è più il riferimento unico di potenziale per l'impianto: occorre in genere prevedere parafulmini; richiede inoltre l'utilizzazione di apparecchi che

consentano il passaggio di correnti di fuga elevate posti a valle delle protezioni differenziali.
[3] Essere sempre vigili e garantire la continuità del conduttore PE in caso di estensione d'installazione
[4] Correnti molto elevate nel conduttore PEN possono essere > kA, perciò è vietato nei locali a rischio
[5] Si verifica la circolazione di corrente di disturbo nelle masse e l'irraggiamento di disturbi EMI da parte del PE. É sconsigliato perché può generare armoniche nell'impianto
[6] La protezione differenziale è di 500 mA
[7] Richiede l'utilizzo di apparecchi che consentano il passaggio di correnti di fuga elevate situate a valle di protezioni differenziali;
[8] Consigliato per la sicurezza intrinseca dovuta alla mancanza d'arco elettrico
[9] Incompatibilità con l'utilizzo di filtri di modo comune. Può essere necessario suddividere l'impianto per ridurre la lunghezza dei cavi e limitare le correnti di fuga dello schema TN nel caso di 2° guasto.

Negli schemi TN-C e TN-S, come negli altri schemi, il conduttore di protezione non deve mai essere interrotto. Nello schema TN-C la funzione “conduttore di protezione” ha precedenza sulla funzione “neutro”. In particolare un conduttore PEN deve essere sempre collegato al morsetto “terra” di un apparecchio e occorre realizzare un ponte tra questo morsetto ed il morsetto neutro.

Gli schemi TN-C e TN-S possono essere utilizzati nello stesso impianto, e in questo caso lo schema TN-C deve essere obbligatoriamente a monte dello schema TN-S. Lo schema TN-S è obbligatorio per cavi di diametro <10mm^2 Cu o <16mm^2 Al o per cavi flessibili (questo per garantire che, anche nel caso di cavi di diametro ridotto, le eventuali tensioni pericolose presenti sulle masse possano scaricare a terra).

4.7 Il layout

Il layout è l'organizzazione e la disposizione dei componenti e dei collegamenti all'interno di un sistema elettrico o elettronico. Il layout è estremamente importante in quanto influenza altri aspetti progettuali quali la creazione di un buon impianto di massa, la lunghezza dei collegamenti, il percorso delle correnti di ritorno, nonché le prestazioni del sistema in ambito EMC.
Esistono principi guida specifici per la progettazione del layout di schede elettroniche, apparecchiature, impianti industriali ecc. Anche in questo caso, tuttavia, valgono alcune regole generali, elencate qui di seguito:

8. **I componenti devono essere raggruppati in base alla loro tipologia e a seconda delle velocità di variazione delle correnti e tensioni in esse presenti, suddividendole in bassa, media ed alta velocità**

Dovrebbero essere predisposte aree riservate per ciascuna tipologia di circuiti individuata:

- alimentazione;
- linee dati I/O;
- apparati di comunicazione radio in ricezione/trasmissione;
- circuiti digitali (questa area deve essere suddivisa a sua volta in sotto-aree contenenti parti circuitali a velocità di commutazione basse, medie, elevate);
- circuiti analogici;
- circuiti e dispositivi di interfaccia con il mondo esterno (sensori, comandi, indicatori);
- display;

Questo perché un posizionamento a gruppi dei dispositivi consente una riduzione complessiva della lunghezza dei collegamenti, e pertanto una minore loro propensione ad irradiare o captare disturbi. Favorisce inoltre la progettazione di un impianto di massa ordinato e a parti isolate, nel quale ogni gruppo ha la sua massa, non condivisa a meno del singolo collegamento previsto nelle modalità SPG o DSPG. Vi è inoltre maggiore facilità di racchiudere i vari gruppi in contenitori schermati chiusi (noti anche come dirty box nel caso degli alimentatori), riducendo notevolmente eventuali accoppiamenti capacitivi e induttivi tra le varie parti del sistema.

9. **Evitare che la lunghezza dei collegamenti interni, verso l'esterno o i collegamenti di massa risultino pari a λ/2 o λ/4, dove λ è la lunghezza d'onda di una possibile frequenza f del disturbo, pari a c/f, dove c è la velocità della radiazione nel vuoto (circa $300 \cdot 10^6$ m/s).**

Questo perché un qualsiasi tratto di conduttore di lunghezza L, non vincolato a massa a nessuna estremità, risuona alla frequenza f=c/2L e verifica la condizione L= λ/2, risultando per il disturbo un'antenna efficiente sia in trasmissione che in ricezione.

Lo stesso fenomeno si verifica quando il tratto di conduttore è collegato a massa ad una estremità, questa volta però per f=c/4L che verifica la condizione L= λ/4.

A questo proposito, è possibile classificare i dispositivi per livelli di sensibilità e disturbo:

Tab 4.7.1: classificazione dei dispositivi per livelli di sensibilità e disturbo

CLASSE*	PERTURBATORE	SENSIBILE	ESEMPI
1 Sensibile		++	- Circuiti ad uscia analogica di basso livello (sensori...) - Circuiti di misura
2 Poco sensibile		+	- Circuiti di controllo su carico resistivo - Circuiti di basso livello digitale (bus...) o con uscita digitale (sensori...) - Alimentazioni continue di basso livello
3 Poco perturbatore	+		- Circuiti di controllo di carichi induttivi (relè, contattori, bobine...) con protezione idonea - Alimentatori in alternata - Alimentazioni principali collegate ad apparecchi di potenza
4 Perturbatore	++		- Macchine saldatrici - Circuiti di potenza in genere - Variatori elettronici, alimentatori a commutazione

* è un termine non normativo, utilizzato nella dispensa sulla compatibilità elettromagnetica di Shneider Electric per distinguere le varie tipologie di dispositivi e segnali da questi emessi, a seconda del grado di suscettibilità e dei livelli di emissione.

Tornando all'esempio del quadro elettrico, per la procedura di montaggio dei componenti al suo interno, è necessario essere a conoscenza, oltre che della potenziale immediata pericolosità dei dispositivi, anche del tipo di disturbi emessi (emissione) in termini di natura, intensità, frequenza, ecc. e del livello di immunità dei dispositivi stessi nei confronti dei disturbi (suscettibilità).
A questo proposito risultano utili le documentazioni del costruttore, all'interno delle quali devono essere evidenziate le caratteristiche del componente quali: potenza, tensione di alimentazione (220V; 380V...), natura dei segnali (AC; DC), frequenza dei segnali (50 Hz; 60 Hz...); e poi ancora il tipo di circuito (commutazione tramite contatti; a semiconduttore), il tipo di carico comandato.

Occorre inoltre individuare i cavi di ingresso (segnale che proviene dall'esterno e penetra all'interno dell'armadio) e di uscita, determinando la natura del segnale trasmesso da questi cavi e dividendoli per “classi”, sempre in base al livello di suscettibilità ed emissione.

Un tipico esempio di ripartizione semplificata dei componenti potrebbe essere il seguente :

Tab 4.7.2: Ripartizione dei componenti per livello di disturbo

Sensibili	Perturbatori
- Controllori programmabili (PC; PLC) - Schede elettroniche - Regolatori - Cavi collegati a questi elementi, di classe 1 o 2 - Cavi di trasmissione dei segnali analogici, di classe 1	- Trasformatori da armadio - Contattori, interruttori automatici, ecc - Fusibili - Alimentazioni a commutazione - Convertitori di frequenza - Variatori di velocità - Alimentazioni DC - Clocks di microprocessori - Cavi collegati a questi elementi - Le linee di alimentazione - Cavi di potenza in genere, di classe 3 o 4

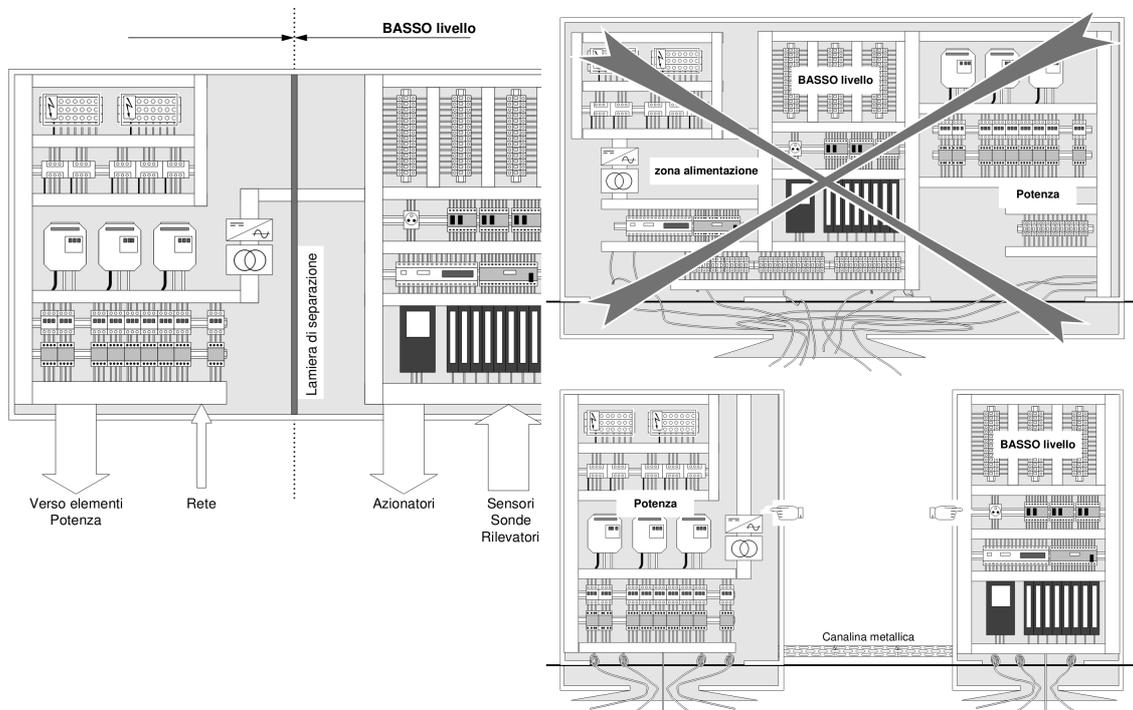



Fig. 4.7.1: disposizione dei componenti all'interno dell'armadio

Inoltre, è bene tenere a mente di non utilizzare lampade fluorescenti, tubi a scarica, ecc. per l'illuminazione degli armadi di comando, in quanto generatori di armoniche. Dal punto di vista EMC erano migliori le vecchie lampade ad incandescenza (ora fuorilegge, ma ancora utilizzabili per applicazioni specifiche come forni, frigoriferi ecc.).

Dunque, dopo aver montato il piano di massa, si deve decidere la disposizione dei vari componenti in base alla loro natura: se possibile gli elementi perturbatori e quelli sensibili devono essere separati e collocati in armadi distinti,

come mostrato in Figura 4.7.1 .
Se per varie ragioni si decide di utilizzare un solo armadio (come nel caso dell'esempio), è possibile operare una separazione mediante lamiere collegate in più punti alla massa, e questo permette di ridurre l'influenza dei disturbi. Nei piccoli armadi in particolare può bastare una tramezzatura realizzata con lamiera metallica imbullonata al telaio. Nel paragrafo 4.13 verrà approfondito l'aspetto relativo alla schermatura.

4.8 Cavi, connettori e cablaggio

I cavi e i connettori sono vie principali attraverso le quali le interferenze elettromagnetiche possono propagarsi all'interno del sistema, o dall'esterno all'interno e viceversa.
Un tipo di cavo importante per risolvere problematiche EMC è il cavo schermato, che però ha lo svantaggio di costare molto e il cui utilizzo viene per questo evitato, soprattutto per le grandi installazioni.
La schermatura è un elemento di forma cilindrica inserito tra i cavi e la guaina protettiva esterna, e può essere di vari tipi: solido, a singola maglia, a doppia maglia, continuo.

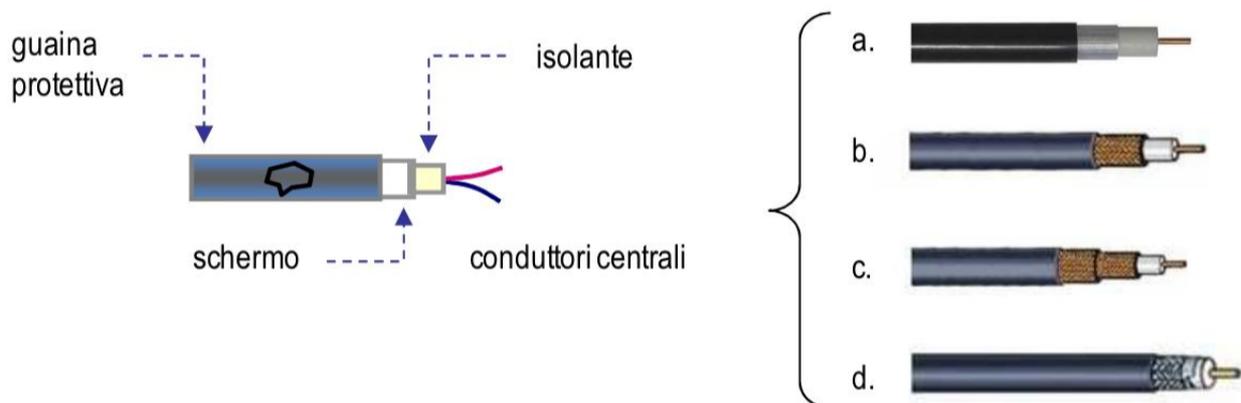



Fig. 4.8.1: Esempi di schermature per cavi

Il parametro che caratterizza la qualità schermante di un cavo in frequenza è l'Impedenza superficiale di trasferimento Z_T .
È importante tenere conto di questo parametro nella scelta di un cavo schermato, ponendolo in relazione con lo spettro in frequenza del disturbo che si desidera attenuare:

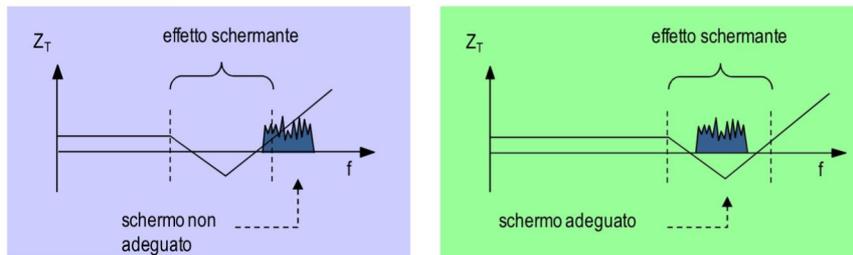



Fig. 4.8.2: Impedenza superficiale di trasferimento di un cavo schermato

10. **L'efficacia di un cavo nei confronti delle emissioni EMC può essere migliorata intrecciando i suoi conduttori interni**

Questo perché idealmente il cavo intrecciato si presenta come una successione di circuiti di area A, con le correnti circolanti metà in senso orario e metà in senso antiorario, risultando in una compensazione e riduzione sia delle emissioni che della suscettibilità.

11. **É importante garantire che le connessioni della schermatura con la massa struttura siano realizzate a 360°, e non solamente in un punto**

In caso contrario l'efficacia schermante del cavo ne verrebbe fortemente compromessa o addirittura annullata (nel caso in cui la schermatura non fosse collegata a massa ad alcuna estremità). É dunque da evitare il cosiddetto “pig tail” ove la schermatura è collegata alla massa mediante un semplice cavo.

Tornando all'esempio del quadro elettrico:
I cavi devono essere divisi per classe e fatti correre in canaline metalliche distinte e separate da una distanza adeguata. I cavi perturbatori, in particolare, devono essere filtrati a partire dall'ingresso dell'armadio e collegati alla massa mediante pressacavi a contatto con la schermatura.

12. **Evitare di mischiare i cavi o avvolgere su se stesso il cavo eccedente.**

Tab. 4.8.1: Tipi di cavi consigliati in funzione del segnale trasmesso

CLASSE	NATURA	CAVI SCONSIGLIATI	CAVI CONSIGLIATI
1	Sensibile	- Unifilare - Doppini - Doppini schermati	- Schermati (trecce) - Schermati misti (schermo + treccia)
2	Poco sensibile	-	Vanno bene tutti i tipi di cavi, con qualche riserva sul tipo unifilare
3	Poco perturbatore	-	Come per la classe 2
4	Perturbatore	-	-

I cavi migliori sono quelli schermati misti, che producono però un aumento dei costi.
Oltre alla schermatura, è possibile eseguire la blindatura dei cavi, facendoli passare attraverso tubi di metallo. É buona regola inoltre collegare a massa, ad entrambe le estremità del cavo, i conduttori non utilizzati.

Tab. 4.8.2: Prestazioni dei cavi dal punto di vista EMC

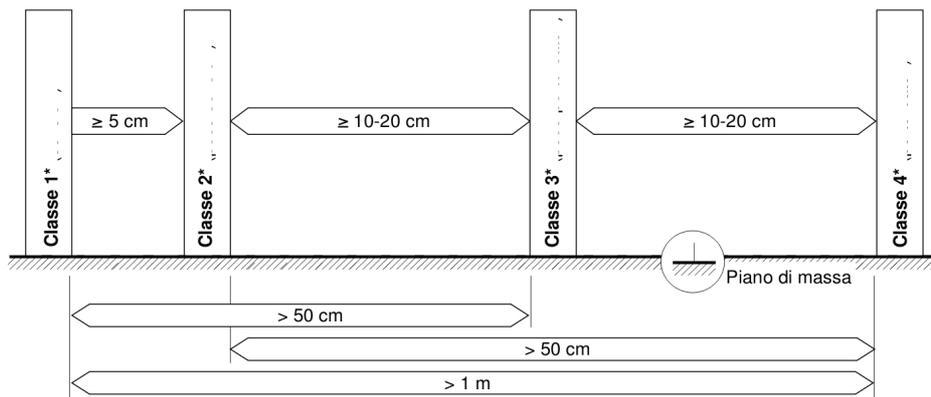
TIPO DI CAVO	DISTURBI CONDOTTI	DISTURBI IRRAGGIATI			MODO COMUNE
		BF: 0-50 Hz	BF: < 5MHz	BF: > 5-30 MHz	
Cavo unifilare	Senza effetto	Medio[1]	Passabile[1]	Insufficiente[1]	Cattivo
Bifilare parallelo		Medio	Passabile	Insufficiente	
Bifilare con doppino ritorto		Buono[2]	Buono fino a 100 KHz	Passabile	Cattivo
Doppino ritorto schermato		Buono	Buono	Medio	Buono
Schermo lamina alluminio...		Medio	Passabile	Insufficiente	
Treccia (tipo di schermatura)		Eccellente	Eccellente	Buono	
Schermo + treccia		Eccellente	Eccellente	Eccellente	

[1] Se l'andata e il ritorno sono molto vicine
[2] Dipende dal numero di torsioni per metro

Per quanto riguarda i percorsi dei cavi:

13. **Mai fare coabitare segnali di classi sensibili (1-2) e perturbatori (3-4) all'interno dello stesso cavo o trefolo di conduttori** (si ricollega alle precedenti regole sul layout)

14. **Ridurre al massimo la lunghezza dei percorsi in parallelo dei cavi che trasportano segnali di classi diverse**

15. **Allontanare al massimo i cavi che trasportano segnali di classi diverse**
É molto efficacie e poco costoso. Per cavi accostati ad un piano di massa e di lunghezza inferiore a 30 m si ha:

La distanza di separazione dovrà essere tanto maggiore quanto più rilevante sarà la lunghezza del percorso dei cavi.

17. **Ridurre al massimo la superficie degli anelli di massa**.
L'anello di massa è formato dal cavo e dal piano di massa e la sua superficie interna deve essere la più piccola possibile (ponendo il cavo a contatto con il piano di massa).

18. **Il conduttore di andata deve essere posato sempre il più vicino possibile al conduttore di ritorno. A tal fine si possono utilizzare cavi bifilari.**

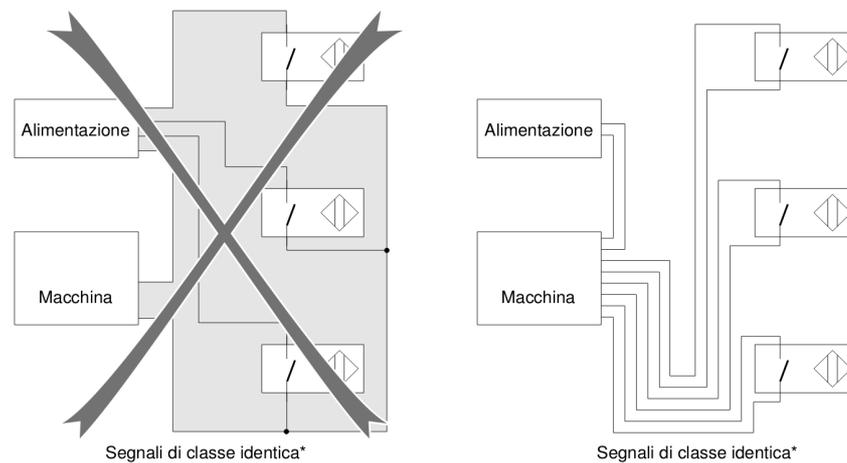



Fig. 4.8.4: Cavi bifilari per ridurre la superficie degli anelli di massa

5. **L'utilizzo di cavi schermati rende possibile la coabitazione di cavi per il trasporto di segnali di classi diverse all'interno della stessa canalina** (sempre entro certi limiti).

19. **Occorre collegare le schermature dei cavi al piano di massa**:

- **Schermatura collegata alle due estremità**: molto efficacie contro i disturbi esterni (in AF ha un effetto riduttore dei disturbi molto elevato, di circa 300), anche alla frequenza di risonanza del cavo. Consente di avvicinare cavi che trasportano segnali di classi diverse (in caso di buon collegamento (360°) e buona equipotenzialità delle masse).

Nel caso di segnali in AF può indurre correnti di fuga a terra per cavi di lunghezza rilevante > 50-100 m.

- **Schermatura collegata ad una sola estremità**: è pericolosa e vietata dalla norma IEC 364 poiché all'estremità della schermatura non collegata a massa può apparire una forte differenza di potenziale. É oltretutto inefficace nei confronti di disturbi esterni in AF in quanto la schermatura può fare da antenna e oscillare. Può andare bene alle BF per evitare il ronzio dovuto a non equipotenzialità delle masse (a causa della circolazione di una corrente nella schermatura). Escludendo la pericolosità si potrebbe dire che ha una efficacia media.
- **Schermatura non collegata alle masse**: vietata se accessibile al contatto diretto perché una forte differenza di potenziale può apparire tra la schermatura e la massa. Ha un'efficacia nulla in termini di protezione contro i disturbi.

20. **Qualsiasi conduttore libero o non utilizzato di un cavo deve essere sistematicamente collegato alla massa (canalina, telaio, armadio...) ad entrambe le estremità**.
Questo potrebbe creare dei problemi per i segnali di classe 1 in BF, a causa del rumore sovrapposto dovuto alla circolazione di una corrente in questi conduttori, ma soltanto in caso di cattiva equipotenzialità delle masse.

21. **Incrociare ad angolo retto i conduttori o cavi che trasportano segnali di classi diverse**

Per quel che riguarda le strutture entro cui possono essere posati i cavi (canaline, tubi...), queste possono offrire una schermatura ulteriore molto efficacie:

22. **Le canaline, canalis, profili angolari, tubi ecc. devono essere in metallo e non in plastica**
Altrimenti non avrebbero semplicemente alcuna efficacia schermante.

23. **L'effetto di schermatura del cavo all'interno di una canalina o di un angolare dipende dalla posizione del cavo stesso**
Se la canalina è aperta, le zone maggiormente protette risultano quelle

vicine agli spigoli interni.

24. **Le estremità di queste strutture devono essere imbullonate al piano di massa, e non semplicemente collegate con dei fili, o peggio prive di collegamento elettrico**.

25. **I cavi di classi diverse non vanno posati all'interno della stessa canalina. Se ciò non fosse possibile, tanto vale lasciare la canalina scoperta, perché altrimenti la situazione verrebbe peggiorata**.

Per quel che riguarda la realizzazione delle interfacce meccaniche, è già stato scritto nel paragrafo 4.4 a che cosa servono, e che si distinguono in bond diretto e indiretto.
Un problema fondamentale in questo caso sta nel garantire la durata nel tempo di questi collegamenti, i quali sono soggetti alla corrosione.
Per proteggere i collegamenti indiretti dalla corrosione potrebbe essere sufficiente della vernice o del grasso, mentre nel caso dei collegamenti diretti occorre tenere in considerazione anche il fenomeno della corrosione causata dai diversi potenziali elettrici dei materiali a contatto.
Sulla base di questo e altri fenomeni sono state ricavate le seguenti importanti regole:

26. **Realizzare una massa struttura con metalli di potenziale elettrico molto vicini tra loro (ad esempio alluminio con lega di magnesio (0.7 V), ma non rame con alluminio (2.03 V))**

27. **Nel caso non sia possibile mantenere una differenza di potenziale limitata nella zona di giunzione, utilizzare rondelle (washer) di materiale ad elevato potenziale, in modo che siano queste ultime a corrodersi e non le parti fisse del sistema. Al primo cenno di corrosione occorre sostituire le rondelle.**

28. **Per realizzare un buon contatto occorre rimuovere vernice, grasso, ossido o pellicole isolanti per un'area che comprenda l'area di contatto maggiorata di almeno 3 mm sul diametro. Occorre inoltre garantire una pressione di contatto approssimativamente di 60 Kg/cm^2. É comunque preferibile la saldatura.**

29. **Garantire la durata del contatto utilizzando rondelle antivibrazione. Proteggere il bond diretto con vernice anti-corrosione**.

30. **Per il bond indiretto utilizzare bandelle metalliche solide piatte con rapporto lunghezza/larghezza < 3 (per lo stesso motivo per cui si**

devono garantire connessioni delle schermature dei cavi a 360°: l'impedenza alle alte frequenze)

4.9 Gli alimentatori

Gli alimentatori, e in generale i dispositivi di conversione della potenza elettrica, sono apparecchi che consentono la trasformazione di una tensione alternata o continua in ingresso in una tensione continua in uscita di livello opportuno e costante entro precisi vincoli di variazione. Sono fondamentali per il funzionamento di molti dispositivi elettronici, e possono avere grandi ricadute sulle prestazioni EMC del sistema oltre che su quelle energetiche.

Esistono diversi tipi di alimentatori, che si distinguono in base al tipo di architettura di conversione implementata e al dimensionamento delle diverse parti del dispositivo:

Tab. 4.9.1: Architetture alimentatori

Tipo di convertitore	Complessità costruttiva	Efficienza energetica	Comportamento EMC
Convertitori dissipativi	Semplice struttura, elevati ingombri a causa del trasformatore a 50 Hz	Bassa (20-40 %)	Buono
Convertitori ferro risonanti	Semplice struttura	Media	Medio
Convertitori a commutazione con controllo di fase	Semplice struttura	Elevata	Scarso
Convertitori a commutazione SMPS (switched mode power supply)	Poco ingombranti e leggeri, necessitano di trasformatori più piccoli (20-200 kHz)	Elevata (60-90 %)	Medio con possibilità di miglioramento a scapito del rendimento energetico

Tornando all'esempio della macchina industriale:

Lo scopo dell'alimentazione è quello di consentire il corretto funzionamento della macchina, per questo occorre garantire che l'energia ad essa fornita sia nella quantità e qualità (quest'ultima in termini di frequenza e forma d'onda) necessarie. L'alimentazione è in genere un'interfaccia tra diverse reti, come per esempio tra rete pubblica BT (Bassa Tensione) e gli utenti abbonati o come tra la rete AT (Alta Tensione) e le varie industrie.

Regole:

31. **É utile filtrare l'alimentazione, collegando un filtro sull'alimentazione industriale**.

32. **É utile installare dei limitatori, scaricatori alla sorgente, che sono tuttavia dei componenti perturbatori e vanno quindi allontanati nel caso di presenza di apparecchiature sensibili**.

33. **É necessario collegare le alimentazioni degli apparecchi nella configurazione a stella, il più vicino possibile all'alimentazione.**

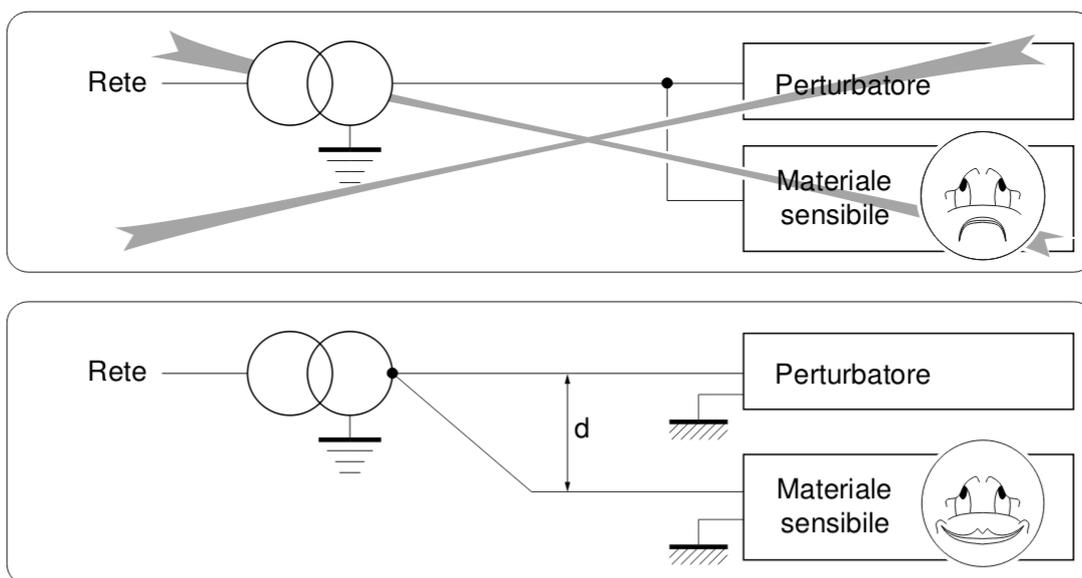



Fig. 4.9.1: Collegamento delle alimentazioni degli apparecchi

34. **Nel caso di impiego di materiali molto sensibili o fonti di forti disturbi, è necessario separare le alimentazioni.**

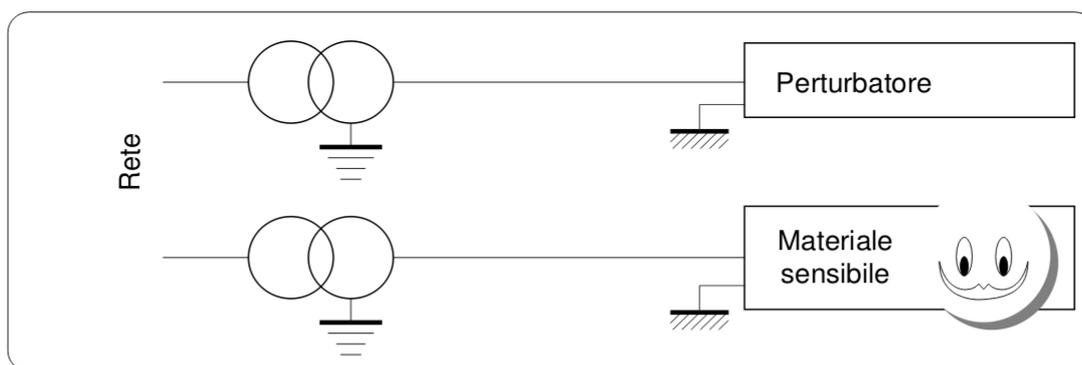



Fig. 4.9.2: Alimentazioni separate

35. **Occorre collegare i circuiti d'alimentazione posizionando i materiali fonte di disturbi il più vicino possibile alla sorgente e i più sensibili il più lontano possibile**.

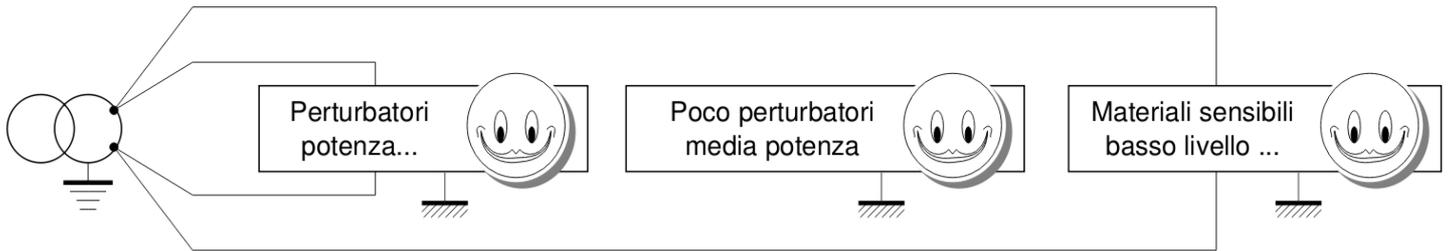



Fig. 4.9.3: Posizionamento dispositivi sensibili e disturbatori

36. **Gli schermi dei trasformatori vanno collegati a massa e la lunghezza delle connessioni deve essere la più corta possibile. Inoltre il telaio del trasformatore deve essere montato a diretto contatto su un piano di massa metallico conduttore**.

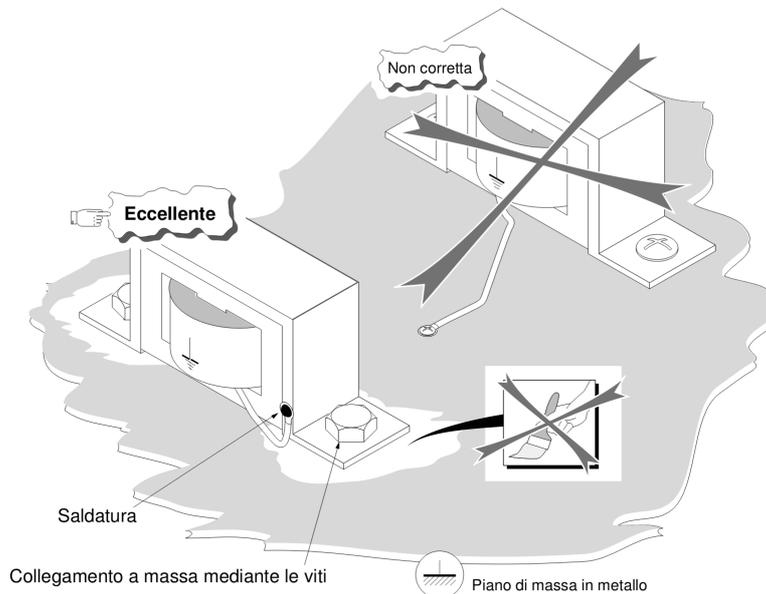



Fig. 4.9.4: collegamento a massa degli schermi dei trasformatori

4.10 Accorgimenti software

Nei sistemi elettronici con microprocessori sarebbe opportuno implementare a livello software degli accorgimenti atti a gestire eventuali errori provocati dalle interferenze elettromagnetiche.
Questi errori possono consistere in un salto del puntatore nel registro delle istruzioni ad un indirizzo non valido, piuttosto che nella alterazione di alcuni bit

di memoria che potrebbero comportare conseguenze negative sul comportamento del dispositivo. Le alterazioni del software sono causate da disturbi impulsivi che si manifestano a livello hardware.

Gli accorgimenti più rilevanti consistono nel:

37. **Abilitare solamente gli interrupt necessari e predisporre delle routine di servizio che si attivino ogni volta che si verifica un interrupt, in modo da gestire il ritorno al programma principale**.

Per interrupt si intende in questo caso un segnale di tipo hardware, generato da periferiche, che costringe il processore ad interrompere l'esecuzione del programma per passare all'esecuzione di speciali soubroutine.

38. **Verifica dei dati trasmessi e ricevuti mediante implementazione di algoritmi per la ricerca e correzione di eventuali errori**.

39. **Riempire la memoria di programma non utilizzata con istruzioni NOP (nessuna operazione), con alla fine una istruzione di salto ad un indirizzo noto** (che può essere una routine di gestione degli errori o il programma principale)

40. **Utilizzare watchdog**

I watchdog sono dispositivi in parte hardware e in parte software che essenzialmente realizzano un conto alla rovescia che deve essere periodicamente resettato dal programma principale. Se il contatore non viene resettato, significa che il microprocessore è entrato in un loop infinito e il watchdog deve quindi attivare una routine di gestione degli errori.

4.11 Predisposizioni EMC

Per predisposizioni EMC si intende proprio il predisporre delle condizioni favorevoli nel caso in cui fosse necessario intervenire con misure di peso per la risoluzione di problemi creati da EMI.
Per esempio è utile realizzare un quadro di dimensioni tali da consentire l'eventuale aggiunta di filtri in prossimità del trasformatore, oppure per consentire l'installazione di ulteriori setti metallici per aumentare l'effetto schermante, oppure per permettere il semplice allontanamento tra loro dei componenti e dei cavi di classi diverse.

41. **Usare quadri elettrici di dimensioni maggiori**

Per le ragioni elencate sopra, ed anche perché ciò si traduce in una maggiore praticità nel montaggio e nella manutenzione, oltre che in una più facile dissipazione del calore generato all'interno del quadro.

4.12 Filtri, ferriti e dispositivi di protezione

I filtri EMI sono componenti, o reti di componenti selettivi in frequenza, in grado di separare il segnale utile da quello di disturbo. Sono utilizzati soprattutto sulle linee di alimentazione, e realizzati principalmente mediante condensatori, induttori e trasformatori. I filtri per le linee di alimentazione, per diversi motivi, sono più complessi da realizzare rispetto ai filtri per linee di segnale, i quali sono quasi sempre progettati in condizioni note di carico agli estremi e in condizioni di adattamento di impedenza.

Le tecniche di filtraggio sono essenzialmente 2:

- **innalzamento dell'impedenza serie alla frequenza del disturbo**: consiste nel fare in modo che l'impedenza vista dal segnale di disturbo sia molto più elevata rispetto a quella vista dal segnale utile, in modo da attenuare il primo e lasciare invece transitare indisturbato il secondo. Il componente che può realizzare questo filtraggio è l'induttore, che viene scelto in base ad opportune tabelle e al suo fattore Q (o fattore di merito). Il progettista deve scegliere l'induttore in modo che la sua banda di azione sia tale da coprire interamente la banda di frequenze del disturbo.

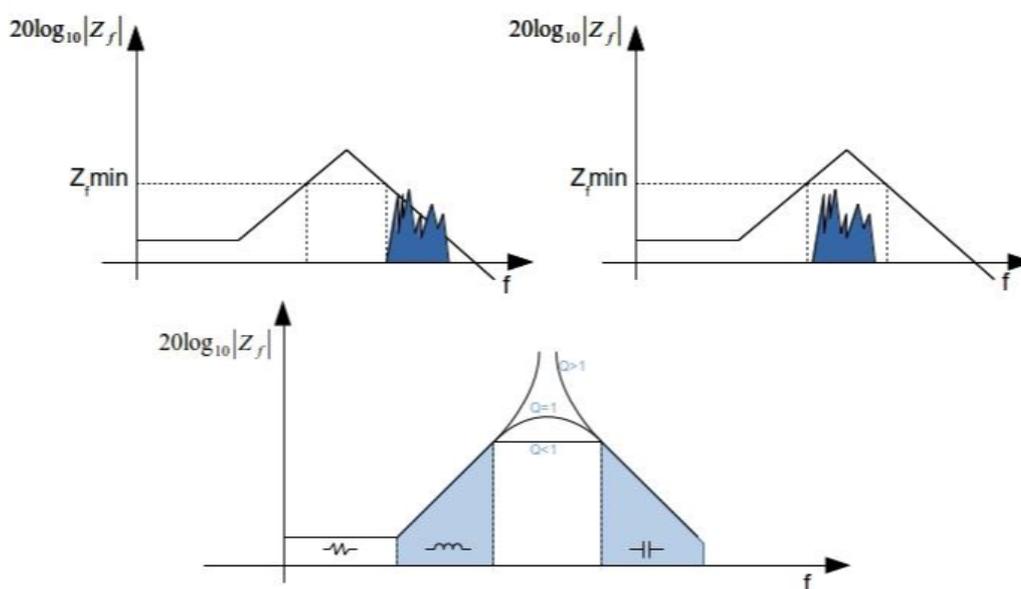



Fig. 4.12.1: Banda di azione dell'induttore

Gli induttori sono tipicamente realizzati mediante avvolgimenti filari in aria o attorno ad un nucleo ferromagnetico. Per alcune applicazioni, per esempio quando il carico è altamente capacitivo, sono preferibili

componenti chiamati ferriti (o ferriti beads), che hanno un andamento a centro banda simile a quello per Q<<1, e non richiedono l'interruzione del cavo su cui sono inserite.

- **deviazione del disturbo (shunt)**: consiste nel fare in modo che la corrente del disturbo ritorni alla sorgente senza proseguire verso il carico, mentre la corrente del segnale utile prosegue indisturbata. Anche in questo caso occorrono dei dispositivi selettivi in frequenza, che utilizzino quest'ultima come parametro discriminante tra segnale di disturbo e segnale utile. In una linea di alimentazione, la deviazione della corrente del disturbo può avvenire tra conduttore di fase e conduttore di neutro, o tra uno di questi e il conduttore di protezione PE.

Nel quadro elettrico:

42. **I filtri devono essere collocati in corrispondenza del foro di ingresso dell'alimentazione nell'armadio, cioè a monte di tutti gli altri dispositivi presenti al suo interno. Inoltre devono essere imbullonati al telaio o al piano di massa di fondo armadio**.

43. **Occorre evitare che i cavi di ingresso e uscita del filtro scorrano paralleli a corta distanza.**

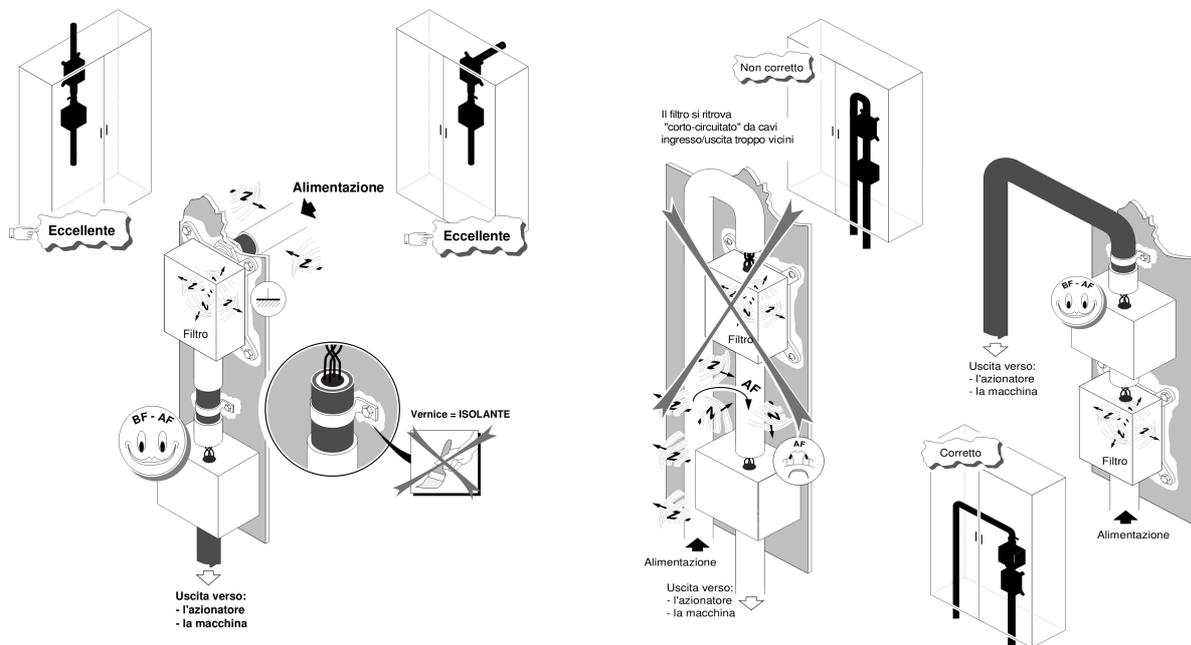



Fig. 4.12.2: Sistemazione dei filtri all'interno dell'armadio elettrico

Esistono dispositivi di protezione contro le sovratensioni, che rappresentano di

fatto dei dispositivi di soppressione dei disturbi aventi le funzioni di:

- ridurre le sovratensioni di interruzione
- ridurre i residui AF (in termini di livello, quantità e pendenza dei fronti di perforazione del dielettrico)

Le sovratensioni possono apparire tipicamente alle estremità di carichi induttivi interrotti da un contatto e presentano un andamento del tipo schematizzato in Figura 4.12.3:

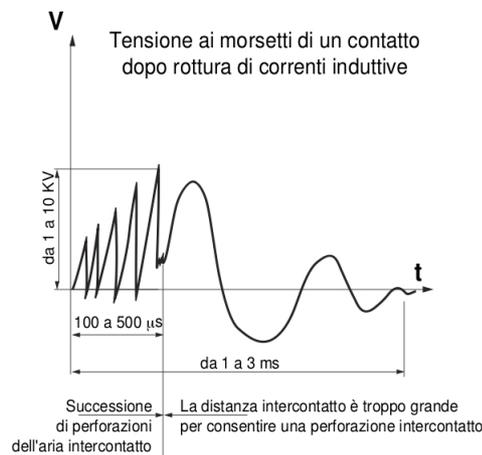
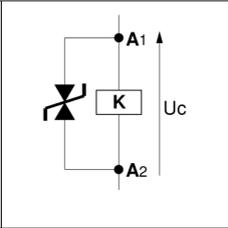
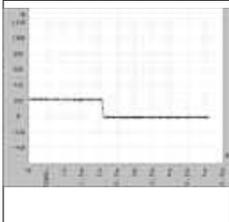
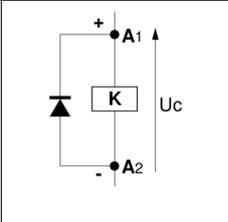



Fig. 4.12.3: Tensione ai morsetti di un contatto dopo una commutazione

Tab. 4.12.1: Effetti sul disturbo di alcuni dispositivi elettronici

Effetto sul disturbo	Tipo di dispositivo anti-disturbo	Schema	Limitazione della sovratensione
	Nessuno	A1 K A2	$V > 1\text{kV}$ Nessuna. La sovratensione è elevata e può raggiungere parecchi kV, preceduta da una serie di perforazioni a fronti ripidi.
	Circuito RC	A1 C K Uc R A2	$V \simeq 2\text{U}_c$ Il circuito RC ha l'effetto di inclinare i fronti permettendo una buona limitazione (circa 2 volte la tensione di comando Uc, variabile in base all'istante di interruzione, al tipo di bobina e ai valori di R e C).
	Varistore	A1 U K Uc A2	$V \simeq 2\text{U}_c$ e predeterminata Limitazione della sovratensione ad un valore di livellamento predeterminato dell'ordine di 2 volte la tensione massima di comando Uc

	Diodo di livellamento bidirezionale		$V \simeq 2\mathrm{U}_c$ e predeterminata Limitazione della sovratensione ad un valore di livellamento predeterminato dell'ordine di due volte la tensione massima di comando Uc
	Diodo volano		U_c Eliminazione totale della sovratensione

I conduttori andata e ritorno del segnale che si desidera filtrare devono passare attraverso la ferrite, che deve essere posta il più vicino possibile all'apparecchio fonte del disturbo. Se la fonte del disturbo non è identificabile o se non è possibile ripulirla dal disturbo, la ferrite deve essere messa in prossimità dell'apparecchio suscettibile. Maggiore è il numero delle spire, maggiore è l'efficacia, ma d'altra parte aumentano le capacità parassite. Il numero massimo delle spire, da non superare, dipende:

- dalla frequenza dei disturbi
- dal cavo
- dalla ferrite

Fig. 4.12.4: Tipi di ferriti

L'utilizzo delle ferriti apribili facilita la loro installazione ma garantisce meno efficacia rispetto all'impiego di ferriti piene.

Disaccoppiamento dei disturbi

In un sistema elettrico/elettronico è necessario isolare la parte di controllo dalla parte di potenza per proteggerla da sbalzi di tensione (anche 10kV) che potrebbero distruggere i circuiti digitali.

Trasformatori d'isolamento:

- sono bidirezionali e più efficienti degli optocoupler (minore perdite di potenza), questo permette il trasferimento di potenza, semplificando in alcuni casi il circuito secondario
- assicura un buon isolamento galvanico solo in BF
- per un isolamento galvanico in AF è necessario un trasformatore a doppio schermo
- blocca e devia le correnti di modo comune verso le masse
- consente di interrompere gli anelli di massa
- si potrebbe dire che i trasformatori d'isolamento sono più adatti ove sia richiesto un trasferimento di potenza

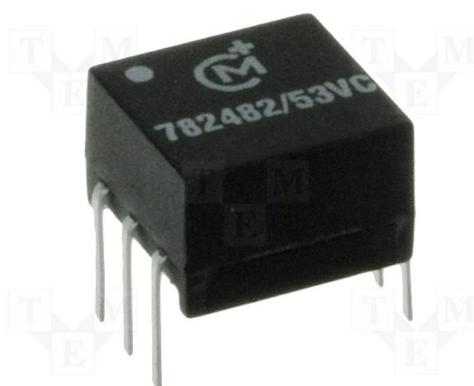



Fig.4.12.5: Trasformatore d'isolamento di segnale Murata, montaggio su PCB

Trasformatore	Rappresentazione	Isolamento	
		BF	AF
Standard	Primario, Secondario	OK	Inefficace
Schermo semplice	Primario, Secondario	OK	Medio
Schermo doppio	Primario, Schermo di modo comune, TN-S, Neutro, PE	OK	Buono

Fig. 4.12.6: Isolamento in BF e AF di un trasformatore

Fotoaccoppiatore (optocoupler):

É costituito da un diodo led che illumina un fototransistore posto a breve distanza, all'interno dello stesso contenitore. A volte tra i due è presente uno schermo elettrostatico.

- sono unidirezionali e comportano una perdita di potenza maggiore
- non richiedono il matching delle impedenze tra circuito Rx e Tx
- sono dispositivi lenti (>10us), ma vi sono anche versioni veloci costituiti da fotoaccoppiatore + transistore (1us)
- sono più adatti per le applicazioni che richiedono un trasferimento di dati.

Fig. 4.12.7: Fotoaccoppiatore della Avago, in formato DIP6

4.13 La schermatura

Le schermature sono barriere fisiche, in materiale metallico, interposte fra l'elemento disturbante e l'elemento vittima nel tentativo di ostacolare la propagazione dei disturbi, principalmente di tipo irradiato.
Esempi di schermature sono: il quadro elettrico in acciaio, le schermature dei cavi, le canaline per cavi, le dirty box ecc.

Il principio di funzionamento è il seguente: le interferenze di tipo irradiato, incidendo sulla superficie della barriera, si trasformano in correnti di disturbo. Tali correnti, non potendo penetrare all'interno della barriera, sono costrette a richiudersi passando attraverso la massa struttura più esterna.

Quanto detto è tanto più vero quanto più risultano verificate le seguenti condizioni:

- I cavi in entrata e in uscita dalla barriera sono schermati e la schermatura è collegata elettricamente alla barriera (che è in metallo), oppure sono state predisposte delle dirty box (barriere ricavate internamente alla barriera esterna più grande) in prossimità dell'ingresso dei cavi.

- I collegamenti di massa sono solamente di tipo MPG e DSPG. Nel collegamento di tipo SPG la massa di riferimento del segnale è portata al di fuori della barriera, violandone l'integrità.
- Sono presenti poche fessure nella barriera, e quelle presenti occupano un'area più piccola possibile.
- La barriera ha spessore elevato.

Una barriera può essere posta in prossimità dell'elemento che irradia il disturbo (regione di campo vicino alla sorgente, da qualche centimetro a qualche metro, cioè $r<\frac{\lambda}{2\cdot\pi}$) oppure in prossimità dell'elemento suscettibile (regione di campo lontano dalla sorgente, decine o anche migliaia di metri, cioè $r>\frac{\lambda}{2\cdot\pi}$).
La conoscenza della posizione della barriera nei confronti del disturbo è di fondamentale importanza per il dimensionamento della stessa.

L'efficienza della qualità schermante di una barriera può essere valutata mediante un parametro noto come efficienza di schermatura (shielding effectiveness,SE) che deve essere valutato frequenza per frequenza (dunque una barriera può essere caratterizzata da diversi SE a seconda della frequenza del disturbo). Idealmente si vorrebbe una SE infinita, ma ciò non si può ottenere nella realtà, soprattutto alle alte frequenze ($SE\simeq 100-200\,dB$), quando la lunghezza d'onda del disturbo è paragonabile o inferiore alle dimensioni delle fessure presenti nella barriera.

$$SE=\frac{|P_I|}{|P_T|}, \qquad (4.13.1)$$

Espressa in dB:

$$SE_{dB}=10\cdot\log_{10}\frac{|P_I|}{|P_T|}, \qquad (4.13.2)$$

P_I è la densità di potenza incidente nel punto di misura in assenza di schermatura, mentre P_T è la densità di potenza incidente nel punto di misura dopo l'inserzione della schermatura (entrambe si esprimono in W/m^2).

L'effetto schermante SE nei confronti dell'onda elettromagnetica incidente può essere visto come prodotto di 3 contributi:

$$SE=A\cdot R\cdot C \qquad (4.13.3)$$

o equivalentemente, in dB:

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + C_{dB} \tag{4.13.4}$$

A: perdite per assorbimento del metallo
R: perdite per riflessione sullo schermo (l'energia non riesce a penetrare)
C: riflessioni multiple all'interno dello schermo: si tratta di un contributo negativo, ovvero incide negativamente sull'efficacia schermante, ma è tuttavia di valore modesto e può essere spesso trascurato.

Nella Figura 4.13.1 sono schematizzati questi 3 contributi:

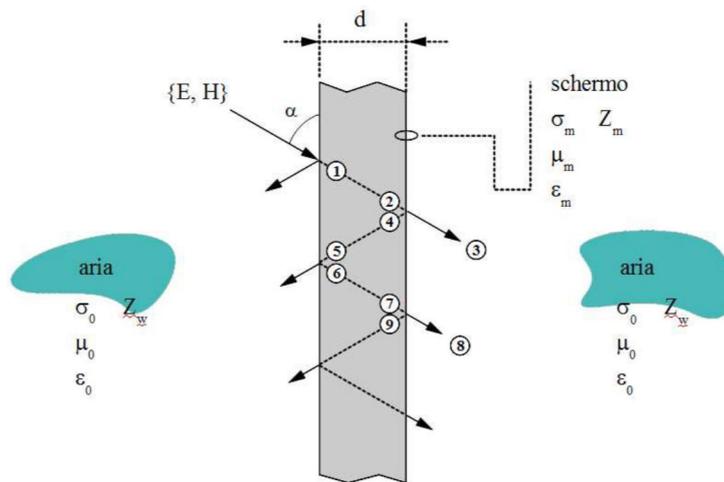



Fig. 4.13.1: Effetto schermante di una barriera

44. Gli involucri metallici rappresentano un buon modo per schermare un dispositivo dalla presenza di un campo elettrico, purché siano collegati a massa in almeno un punto. In assenza di questo collegamento, lo schermo diviene completamente inefficace.

45. Si verifica sperimentalmente che la riflessione è il contributo che incide maggiormente sull'efficacia schermante della barriera.

Tuttavia è necessario fare 2 distinzioni:

- barriera nella regione di campo lontano dalla sorgente:
  - alte frequenze: nessuna attenuazione per riflessione
  - basse frequenze: riflessione completa (l'onda non attraversa la barriera)
- barriera nella regione di campo vicino alla sorgente:
  - sorgente con prevalenza di campo elettrico: attenuazione per riflessione elevatissima, che cala velocemente all'aumentare della frequenza; lo spessore della barriera non conta.
  - sorgente con prevalenza di campo magnetico: attenuazione per riflessione piccola, che aumenta con l'aumentare della frequenza, ma rimane bassa;

lo spessore della barriera non conta.

Si deduce che vale la pena investire sulla qualità riflettente della barriera, soprattutto nella regione di campo lontano dalla sorgente. Mentre nella regione di campo vicino alla sorgente, il contributo della riflessione nella SE dipende dalla natura della sorgente del disturbo.

46. **Aumentare lo spessore della barriera permette di aumentare il suo potere schermante.**

47. **Eliminare le fessure presenti nella barriera, a cominciare da quelle di dimensione maggiore, permette di aumentare il suo potere schermante, soprattutto nei confronti delle alte frequenze.**

Per il principio di Babinet, una fessura si comporta come un dipolo elettrico delle stesse dimensioni della fessura, con un campo elettrico e magnetico emessi semplicemente ruotati di 90°. Se la larghezza della fessura è pari a $\frac{\lambda}{2}$, essa si comporta da antenna di risonanza per quella frequenza di disturbo, vanificando la presenza della schermatura (ovvero $SE_{dB} \simeq 0_{dB}!!$)

48. **Maggiore è la frequenza del disturbo, maggiore sarà l'efficacia della barriera a parità di spessore, tuttavia diventeranno più rilevanti le piccole fessure (di dimensioni paragonabili o inferiori alla lunghezza d'onda del disturbo) presenti sullo schermo.**

49. **Nel caso in cui sia necessario scegliere, a parità di area complessiva di apertura, tra una soluzione con poche aperture ma di grandi dimensioni e una soluzione con tante aperture ma di piccole dimensioni , è da preferire la seconda in termini di effetto sulla SE.**

50. **É possibile ridurre l'effetto negativo delle aperture aumentando lo spessore delle stesse, cioè prolungando le aperture verso l'interno e se possibile verso l'esterno (per esempio mediante un tubo saldato nel caso di singola apertura di forma circolare)**

51. **Nella progettazione delle giunzioni tra superfici (ad esempio quadro elettrico e sportello dello stesso), seguire le seguenti regole:**
    - **Le superfici a contatto devono realizzare un buon contatto elettrico, sovrapponendo il più possibile le superfici di giunzione**
    - **Utilizzare guarnizioni conduttive o vernici conduttive**
    - **Gli elementi di fissaggio, come le viti, non devono distare tra loro più di λ/50**

Le considerazioni fatte sulla SE valgono solamente nel caso di onde elettromagnetiche incidenti sulla superficie dello schermo con entrambi i vettori E ed H tangenti alla superficie stessa.
Tuttavia considerazioni molto simili si possono fare nel caso di onde elettromagnetiche con uno dei due vettori E o H tangenti alla superficie e l'altro ortogonale alla stessa. In ogni caso nella progettazione delle schermature, data la complessità dei fattori in gioco, sarebbe opportuno avvalersi di software per la simulazione per ottenere risultati più realistici.

Conclusioni

La compatibilità elettromagnetica è un argomento vasto. In questa tesi è stata privilegiata l'esposizione degli aspetti relativi alla compatibilità elettromagnetica di tipo generale, con un accenno a quelle che potrebbero essere le problematiche e le soluzioni in ambito EMC nel caso di equipaggiamenti elettrici di “bordo macchina”. Di fatto ciascun aspetto potrebbe essere ulteriormente sviluppato, così come anche le regole pratiche di valenza generale esposte.

Per quanto riguarda i “fenomeni” riconducibili a EMI, si potrebbe concludere che la causa fondamentale delle interferenze elettromagnetiche sono le variazioni di tensioni e correnti causate dalla commutazione di dispositivi elettronici, elettrici o elettromeccanici. Questo si traduce in interferenze principalmente di tipo condotto e/o irradiato.

Le interferenze elettromagnetiche possono comportare il danneggiamento di parti della macchina e un pericolo indiretto per la sicurezza delle persone se vengono trascurate.
Gli utenti finali delle apparecchiature con equipaggiamento elettrico o elettronico possono probabilmente non aver mai avuto esperienza diretta di problemi creati dalle interferenze elettromagnetiche, e quindi pensare erroneamente che si tratti di una questione di rilevanza trascurabile, e che la pratica della progettazione con criteri EMC rappresenti una sorta di “eccesso di zelo” da parte del progettista.

Questo è dovuto al fatto che la progettazione di sistemi elettrici o elettronici tiene conto già da molto tempo della EMC; infatti un prodotto non potrebbe essere immesso sul mercato se non fosse elettromagneticamente compatibile.

Gli esperti in merito EMC sostengono che, nella quasi totalità dei casi, sia sufficiente disporre diversamente i componenti, spostare qualche collegamento o intervenire sull'architettura dell'impianto di massa, e tutto questo senza comportare un aumento dei costi di progetto o di singolo prodotto.

Progettare con criteri EMC significa applicare regole di valenza generale che riducono al minimo la probabilità di riscontrare problemi nel funzionamento, causati dalle interferenze elettromagnetiche. Ciò si concretizza nell'implementazione di accorgimenti di costo trascurabile ancora in fase di progettazione per poi passare, eventualmente fosse necessario, a misure di peso via via maggiore.

Bibliografia

M. Bertocco, A. Sona, 2006, *EMC su PCB*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova

E. Giovannini, F. Ricci, *L'equipaggiamento elettrico delle macchine*, Convegno La normativa macchine: obblighi e responsabilità, ASL1 di Massa e Carrara, 2005.

Micaela Liberti, *Introduzione alla compatibilità elettromagnetica*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni, Università di Roma “La Sapienza”.

Antonio Maffucci, *Appunti sulla normativa EMC,* Università degli Studi di Cassino.

M. Marconi, S. Piccagli, *EN 60204-1 Sicurezza del macchinario. Equipaggiamento elettrico delle macchine* (www.aceconsulting.it), Udine, 2009.

P. Massimi, J.P. Van Gheluwe, Normativa comunitaria sulle macchine. Commenti alle direttive 89/392/CEE e 91/368/CEE, 1993.

Schneider Electric S.p.A, 2012, *Messa a terra e compatibilità elettromagnetica dei sistemi PLC*.

Schneider Electric S.p.A, *Compatibilità elettromagnetica EMC. Manuale didattico*.

Alessandro Sona, *Aspetti di progettazione*, Compatibilità elettromagnetica e Sicurezza Elettrica A.A. 2011/2012, Università degli Studi di Padova.

Enrico Tagliapietra, 2010-2011, *Norme di base delle prove di immunità ai disturbi elettromagnetici*, Tesi di laurea triennale, Università degli Studi di Padova.

Vilardi Giuseppe Ottavio, 2009, *Sistemi a logica programmabile e a logica cablata. Aspetti normativi*, Corso di sistemi per l'automazione industriale, Politecnico di Milano.

Azienda Sanitaria di Firenze (http://www.asf.toscana.it), 01 gennaio 2014

Test'ing srl (http://www.test-ing.it/sp/prove-di-compatibilita-ele...), 29 ottobre 2013

Elpav Instruments (http://www.elpav.it/EMC.html), 29 ottobre 2013

LaurTec (http://www.laurtec.it), 29 ottobre 2013